

공학박사학위논문

미세 패턴의 박막 두께와 광학 상수 측정을 위한 마이크로 분광 타원계 개발

Development of micro-spectroscopic ellipsometry for thickness and optical constant measurement of fine patterns on thin film

2018 년 2 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 재 호

미세 패턴의 박막 두께와 광학 상수 측정을 위한 마이크로 분광 타원계 개발

Development of micro-spectroscopic ellipsometry for thickness and optical constant measurement of fine patterns on thin film

지도교수 박 희 재

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2017 년 10 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 재 호

김재호의 공학박사 학위논문을 인준함

2017 년 11 월

위 원 장 : 김 종 원 (인)

부위원장 : 박 희 재 (인)

위 원 : 권 혁 동 (인)

위 원 : 안 성 훈 (인)

위 원 : 김 성 룡 (인)

국문 초록

디스플레이 및 반도체 산업에서 공정이 갈수록 고 집적화됨에 따라 미세패턴의 박막 측정 수요가 발생하고 있다. 여기서는 박막의 두께 측정 뿐만 아니라 박막의 성능을 검증하기 위한 광학 상수의 측정 또한 요구 되고 있다.

산업에서 박막 측정에 사용되는 최고 성능 장비는 타원계이다. 하지만 빛을 비스듬하게 입사 시켜야 되기 때문에 고 배율 렌즈를 조합 할 경우, 충돌 위험성으로 인해 측정 영역을 줄이기 힘든 문제가 있다. 이를 해결 하기 위해 수직 입사 방식을 이용한 마이크로 타원계의 연구가 진행 되었다. 이는 측정 영역을 줄이는 데는 용이 했지만 지금까지는 단파장 광원만 사용이 가능했기 때문에 측정 분해능이 떨어지는 문제가 있었다.

이러한 문제들을 개선 시키기 위해 다파장 광원을 사용할 수 있는 마이크로 분광 타원계를 구성하고 제작 했다. 빛의 수직 입사와 코노스코피 방식을 조합해 직경 60um의 미세 영역을 측정 할 수 있는 동시에, 400 ~ 800nm 영역의 다파장 데이터 사용으로 박막 특성 변화에 따른 신호 변화의 민감도를 향상 시켜서 측정의 분해능을 향상시켰다. 광학계의 측정 신호를 모델링하여 타원 파라미터를 분석 할 수 있는 방법을 제시 했으며 여러 요인을 분석하여 모델링 신호의 오차 보정을 실시 하였다. 그리고 두께와 광학상수를 동시에 정확히 산출 할 수 있는 피팅 알고리즘을 완성하였다. 산업 현장에서 실제 생산되는 500Å ~ 1.1um 두께 범위의 SiO_2 on Si, SiN_x on Glass, a-si on Glass 샘플에 대해 두께 및 광학 상수 측정 테스트를 했으며 기존의 고성능 분광 타원계와 비교하여 측정 성능을 검증했다. 두께의 경우 최대 정확도 1.59%, 3σ 반복도 2.1Å이 나왔고, 굴절률의 경우 최대 정확도 1.31%, 3σ 반복도 0.0026이 나왔다.

주요어 : 두께, 광학 상수, 미세 패턴, 측정, 코노스코피(Conoscopy), 타원계(Ellipsometry), 마이크로 분광 타원계(Micro-Spectroscopic Ellipsometry)
학 번 : 2010 - 23206

목차

국문 초록.....	i
목차.....	ii
그림 목차.....	v
표 목차.....	xii
기호 설명.....	xiv
약어 설명.....	xv
제 1 장 서론.....	1
1.1. 연구 배경.....	1
1.2. 연구 동향.....	4
1.2.1. 반사계.....	4
1.2.2. 타원계.....	5
1.2.3. 마이크로 타원계.....	8
1.3. 연구 내용.....	12
제 2 장 타원계 기본 배경 이론.....	13
2.1. 기본 광학 이론.....	13
2.1.1. 빛의 굴절과 반사.....	13
2.1.2. 박막에서의 다중 반사 이론.....	17
2.1.3. Brewster Angle.....	19
2.1.4. 타원 파라미터.....	21
2.2. 타원계.....	23
2.2.1. 기본 적인 타원계의 구성.....	23
2.2.2. 타원 파라미터의 산출 방법.....	25
2.2.3. 타원 파라미터를 이용한 측정 결과 값 산출.....	32

2.3. 마이크로 타원계	33
2.3.1. 마이크로 타원계의 기본 원리	33
2.3.2. 마이크로 타원계에서의 타원 파라미터 산출	35
제 3 장 광원에 따른 마이크로 타원계 신호 시뮬레이션	42
3.1. 단과장 마이크로 타원계의 한계	42
3.2. 다과장 마이크로 타원계를 통한 성능 개선	50
제 4 장 마이크로 분광 타원계의 구성	60
4.1. 다과장을 이용하는 마이크로 타원계의 구현 방식	60
4.2. 마이크로 분광 타원계의 광학계 구성	61
4.2.1. 개요도	61
4.2.2. 광원	63
4.2.3. 편광판	64
4.2.4. 빔 스플리터	66
4.2.5. 대물 렌즈	70
4.2.6. 스펙트로미터	71
4.2.7. 카메라	72
4.2.8. 편홀	73
4.3. 실제 광학계 제작	74
제 5 장 마이크로 분광 타원계의 해석	77
5.1. 개요	77
5.2. Polarizer의 회전에 따른 출사동의 광 강도 모델링	78
5.3. 편광판의 위치각 정렬	87
5.4. 측정된 광 강도에서의 푸리에 계수 산출	90
5.5. 모델링 신호 오차 보정	93
5.5.1. 빔 스플리터의 타원 파라미터 물성치 보정	93
5.5.2. 스펙트로미터 스팟 영역에 의한 효과 보정	97

제 6 장 피팅 알고리즘 구현	110
6.1. 광학 상수 모델링 식	110
6.1.1. Cauchy	110
6.1.2. Tauc-Lorentz	111
6.2. 두께, 광학 상수 동시 피팅 알고리즘	114
제 7 장 두께 및 광학 상수 측정 테스트	122
7.1. 개요	122
7.2. SiO ₂ on Si 웨이퍼 샘플	123
7.3. SiN _x on Glass 샘플	129
7.4. a-Si on Glass 샘플	135
7.5. 정리	143
제 8 장 결론	146
REFERENCE	148
APPENDIX	154
A. 렌즈의 복굴절 현상 고려	154
ABSTRACT	162

그림 목차

<그림 1. 1 리소그래피 및 식각 공정>.....	1
<그림 1. 2 빛을 비스듬하게 입사 시킬 때의 스폿 크기 제약>.....	3
<그림 1. 3 일반적인 분광 반사계 개요도>.....	5
<그림 1. 4 일반적인 타원계에 대물 렌즈, 2D 카메라를 조합한 방법 [29]>	6
<그림 1. 5 2D 카메라의 픽셀 별 분석을 통한 수평 방향 분해능 향상 [29]>	7
<그림 1. 6 대물 렌즈의 개구수로 인한 빛의 비스듬한 입사[38]>.....	9
<그림 1. 7 샘플의 이미지를 이용한 마이크로 타원계[32]>.....	9
<그림 1. 8 출사동 면의 광 강도를 이용한 마이크로 타원계[38]>.....	10
<그림 1. 9 단파장 수직 입사 마이크로 타원계에서의 박막의 두께 미세 변화에 따른 신호의 분별력 부족[38]>	11
<그림 2. 1 서로 다른 두 매질 사이에서의 빛의 입사와 굴절 및 반사>	14
<그림 2. 2 빛의 반사에서 입사 면과 P파, S파의 정의>.....	15
<그림 2. 3 박막에서의 빛의 다중 반사>	17
<그림 2. 4 다양한 입사각에 따른 반사도 그래프와 BREWSTER ANGLE>	20

〈그림 2. 5 타원 파라미터에 따른 빛의 편광 상태〉	22
〈그림 2. 6 PSA형 타원계의 개요도〉.....	23
〈그림 2. 7 PCSA형 타원계의 개요도〉	24
〈그림 2. 8 POLARIZER의 회전에 따른 광 강도 변화〉.....	29
〈그림 2. 9 단과장 광원에 따른 푸리에 계수 데이터〉.....	30
〈그림 2. 10 대물 렌즈의 방위각에 따른 빛의 편광〉	34
〈그림 2. 11 대물 렌즈 중심으로부터의 거리에 의한 빛의 입사각 변화〉	35
〈그림 2. 12 일반적인 수직 입사 코노스코피 마이크로 타원계의 개요도〉	36
〈그림 2. 13 출사동 이미지에서 방위각에 따른 광 강도 변화〉.....	40
〈그림 2. 14 다양한 입사각에 따른 푸리에 계수〉	41
〈그림 3. 1 단과장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 두께에 따른 α_2 신호〉	43
〈그림 3. 2 단과장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 두께에 따른 α_4 신호〉	43
〈그림 3. 3 단과장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 두께의 미세 변화에 따른 α_2 신호 변화〉	44
〈그림 3. 4 단과장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 두께의 미세 변화에 따른 α_4 신호 변화〉.....	45

〈그림 3. 5 단파장 마이크로 타원계에서 두께를 10Å 씩 변화 시켰을 때의 α_2 RMSE 그래프〉	46
〈그림 3. 6 단파장 마이크로 타원계에서 두께를 10Å 씩 변화 시켰을 때의 α_4 RMSE 그래프〉	46
〈그림 3. 7 단파장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 굴절률의 미세 변화에 따른 α_2 신호 변화〉	47
〈그림 3. 8 단파장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 굴절률의 미세 변화에 따른 α_4 신호 변화〉	48
〈그림 3. 9 단파장 마이크로 타원계에서 굴절률을 0.01씩 변화 시켰을 때의 α_2 RMSE 그래프〉	49
〈그림 3. 10 단파장 마이크로 타원계에서 굴절률을 0.01씩 변화 시켰을 때의 α_4 RMSE 그래프〉	49
〈그림 3. 11 다파장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 두께에 따른 코사인 푸리에 계수 신호〉	52
〈그림 3. 12 다파장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 두께에 따른 사인 푸리에 계수 신호〉	52
〈그림 3. 13 다파장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 두께의 미세 변화에 따른 코사인 푸리에 계수 신호 변화〉	53
〈그림 3. 14 다파장 마이크로 타원계에서 SiO ₂ 두께의 미세 변화에 따른 사인 푸리에 계수 신호 변화〉	54

<p><그림 3. 15 다파장 마이크로 타원계에서 두께를 10Å씩 변화 시켰을 때 의 코사인 푸리에 계수 RMSE 그래프></p> <p><그림 3. 16 다파장 마이크로 타원계에서 두께를 10Å씩 변화 시켰을 때 의 사인 푸리에 계수 RMSE 그래프></p> <p><그림 3. 17 다파장 마이크로 타원계에서 SiO₂ 굴절률의 미세 변화에 따른 코사인 푸리에 계수 신호 변화></p> <p><그림 3. 18 다파장 마이크로 타원계에서 SiO₂ 굴절률의 미세 변화에 따른 사인 푸리에 계수 신호 변화></p> <p><그림 3. 19 다파장 마이크로 타원계에서 굴절률을 0.01씩 변화 시켰을 때의 코사인 푸리에 계수 RMSE 그래프></p> <p><그림 3. 20 다파장 마이크로 타원계에서 굴절률을 0.01씩 변화 시켰을 때의 사인 푸리에 계수 RMSE 그래프></p>	<p>55</p> <p>55</p> <p>56</p> <p>57</p> <p>58</p> <p>58</p>
<p><그림 4. 1 마이크로 분광 타원계의 개요도></p> <p><그림 4. 2 실험에 사용된 할로젠 광원 스펙트럼></p> <p><그림 4. 3 편광판에서의 빛의 편광></p> <p><그림 4. 4 THORLABS GLAN TAYLER POLARIZER></p> <p><그림 4. 5 THORLABS BS010 빔 스플리터></p> <p><그림 4. 6 파장 변화에 따른 빔 스플리터의 투과율 변화></p> <p><그림 4. 7 빔 스플리터 회전에 의한 편광 효과 상쇄></p>	<p>61</p> <p>64</p> <p>65</p> <p>66</p> <p>67</p> <p>68</p> <p>69</p>

<그림 4. 8 MAYA 2000 PRO 스펙트로미터>.....	71
<그림 4. 9 실제 제작된 광학계의 정면 사진>.....	75
<그림 4. 10 실제 제작된 광학계의 측면 사진>.....	76
<그림 5. 1 출사동의 광 강도 모델링>.....	77
<그림 5. 2 출사동 면에서의 스펙트로미터 스팟 위치 정렬>.....	86
<그림 5. 3 편광판 위치각 정렬 작업>.....	89
<그림 5. 4 이번 연구에서 기준이 되는 스펙트로미터 스팟 위치>	91
<그림 5. 5 POLARIZER의 회전에 따른 파장 별 광 강도 신호 및 측정 된 푸리에 계수>.....	92
<그림 5. 6 파장에 따른 빔 스플리터의 $TAN\psi$ 그래프>	95
<그림 5. 7 파장에 따른 빔 스플리터의 Δ 그래프>.....	95
<그림 5. 8 빔 스플리터 물성치 보정 효과 비교>.....	96
<그림 5. 9 출사동 면에서의 스펙트로미터 스팟 영역>	97
<그림 5. 10 스팟의 영역에 의한 다중 방위각 빛의 합성>.....	98
<그림 5. 11 스팟의 위치에 따른 방위각 적분 범위의 변화>	99
<그림 5. 12 방위각 적분 범위 변화에 따른 광 강도 변화>	100
<그림 5. 13 방위각 적분 범위에 따른 광 강도 정규화 그래프 비교>	101
<그림 5. 14 방위각 적분 범위에 따른 푸리에 계수 비교>.....	102
<그림 5. 15 스팟의 영역에 의한 다중 입사각 빛의 합성>.....	103

<그림 5. 16 스팟의 위치에 따른 입사각의 적분 범위 변화>	104
<그림 5. 17 스펙트로미터 스팟 영역에 의한 다중 입사각 보정 효과>	109
<그림 6. 1 일반적인 CAUCHY 모델링 개형>	111
<그림 6. 2 일반적인 TAUC LORENTZ 모델링 개형>	114
<그림 6. 3 비선형 피팅만 사용했을 경우의 극솟값 수렴>	115
<그림 6. 4 그리드 탐색과 비선형 피팅의 조합을 통한 정확도 향상>	116
<그림 6. 5 SiO ₂ 박막 두께 변화에 따른 푸리에 계수 개형 변화>.....	117
<그림 6. 6 SiO ₂ 박막 굴절률 변화에 따른 푸리에 계수 개형 변화>	118
<그림 6. 7 두께, 광학 상수 동시 피팅 알고리즘>	119
<그림 6. 8 완성된 피팅 알고리즘 개요도>	121
<그림 7. 1 MIKROPAC SiO ₂ 샘플>	123
<그림 7. 2 MIKROPAC SiO ₂ 샘플의 단면>	124
<그림 7. 3 SiO ₂ 샘플 두께 측정 결과 그래프>	125
<그림 7. 4 SiO ₂ 샘플 두께 측정 정확도 그래프>	125
<그림 7. 5 SiO ₂ 샘플 굴절률 측정 결과 그래프>	126
<그림 7. 6 SiO ₂ 샘플 굴절률 측정 정확도 그래프>	127
<그림 7. 7 SiO ₂ 샘플 두께 측정 반복도 그래프>	128

<그림 7. 8 SiO ₂ 샘플 굴절률 측정 반복도 그래프>.....	129
<그림 7. 9 SiNx 샘플 두께 측정 결과 그래프>.....	130
<그림 7. 10 SiNx 샘플 두께 측정 정확도 그래프>	131
<그림 7. 11 SiNx 샘플 굴절률 측정 결과 그래프>	132
<그림 7. 12 SiNx 샘플 굴절률 측정 정확도 그래프>.....	132
<그림 7. 13 SiNx 샘플 두께 측정 반복도 그래프>	133
<그림 7. 14 SiNx 샘플 굴절률 측정 반복도 그래프>	134
<그림 7. 15 A-Si 샘플 두께 측정 결과 그래프>	136
<그림 7. 16 A-Si 샘플 두께 측정 정확도 그래프>	136
<그림 7. 17 A-Si 샘플 굴절률 측정 결과 그래프>	137
<그림 7. 18 A-Si 샘플 굴절률 측정 정확도 그래프>.....	138
<그림 7. 19 A-Si 샘플 소광률 측정 결과 그래프>	139
<그림 7. 20 A-Si 샘플 소광률 측정 정확도 그래프>.....	139
<그림 7. 21 A-Si 샘플 두께 측정 반복도 그래프>	140
<그림 7. 22 A-Si 샘플 굴절률 측정 반복도 그래프>.....	141
<그림 7. 23 A-Si 샘플 소광률 측정 반복도 그래프>.....	142
<그림 7. 24 두께 측정 최대 정확도 정리 그래프>.....	143
<그림 7. 25 굴절률 측정 최대 정확도 정리 그래프>	144
<그림 7. 26 두께 측정 최대 반복도 정리 그래프>.....	144
<그림 7. 27 굴절률 측정 최대 반복도 정리 그래프>	145

<그림 A. 1 렌즈의 복굴절로 인한 P파, S파의 투과 계수 차이 발생>	154
<그림 A. 2 렌즈의 복굴절로 인한 P파, S파 간의 위상 지연 발생> ...	155

표 목차

<표 3. 1 타원계의 발전 과정 [43]>	50
<표 3. 2 SIO2 샘플의 10Å 두께 변화에 따른 측정 신호 RMSE>	59
<표 3. 3 SIO2 샘플의 0.01 굴절률 변화에 따른 측정 신호 RMSE>...	59
<표 4. 1 MAYA 2000 PRO SPECIFICATION>	72
<표 7. 1 HORIBA 고성능 분광 타원계 사양>	122
<표 7. 2 SIO2 샘플 두께 측정 결과>	124
<표 7. 3 SIO2 샘플 굴절률 측정 결과>	126
<표 7. 4 SIO2 샘플 두께 측정 반복도>	127
<표 7. 5 SIO2 샘플 굴절률 측정 반복도>	128
<표 7. 6 SINX 샘플 두께 측정 결과>	130

<표 7. 7 SINX 샘플 굴절률 측정 결과>.....	131
<표 7. 8 SINX 샘플 두께 측정 반복도>.....	133
<표 7. 9 SINX 샘플 굴절률 측정 반복도>.....	134
<표 7. 10 A-SI 샘플 두께 측정 결과>.....	135
<표 7. 11 A-SI 샘플 굴절률 측정 결과>	137
<표 7. 12 A-SI 샘플 소광률 측정 결과>	138
<표 7. 13 A-SI 샘플 두께 측정 반복도>	140
<표 7. 14 A-SI 샘플 굴절률 측정 반복도>.....	141
<표 7. 15 A-SI 샘플 소광률 측정 반복도>.....	142

기호 설명

N	복소굴절률
n	굴절률
k	소광률
r_p, r_s	프레넬 반사계수 (p 파, s 파)
t_p, t_s	프레넬 투과계수 (p 파, s 파)
$\mathfrak{R}_p, \mathfrak{R}_s$	반사도 (p 파, s 파)
R_p, R_s	총 반사계수 (p 파, s 파)
ψ	빛이 박막에서 반사될 때 p 파, s 파의 진폭 변화 비
Δ	빛이 박막에서 반사될 때 p 파, s 파의 위상 변화 차
E_{out}	센서에서 검출 되는 전기장
E_{in}	광원으로부터 나오는 전기장
T_P	Polarizer 에 의한 편광 상태 변환 행렬
T_A	Analyzer 에 의한 편광 상태 변환 행렬
T_S	샘플 면에서의 반사에 의한 편광 상태 변환 행렬
$R(\theta)$	좌표계 변환 행렬
α	코사인 푸리에 계수
β	사인 푸리에 계수

$T_{r,BS}$	빔 스플리터에서의 반사에 의한 편광 상태 변환 행렬
$r_{BS,p}, r_{BS,s}$	빔 스플리터에서의 반사 계수 (p 파, s 파)
$T_{t,BS}$	빔 스플리터에서의 투과에 의한 편광 상태 변환 행렬
$t_{BS,s}, t_{BS,s}$	빔 스플리터에서의 투과 계수 (p 파, s 파)
φ	출사동에서의 방위각
$\psi_{r,BS}$	빛이 빔스플리터에서 반사 될때의 p 파, s 파의 진폭 변화 비
$\Delta_{r,BS}$	빛이 빔스플리터에서 반사 될때의 p 파, s 파의 위상 변화 차

약어 설명

PR	Photo Resist
CVD	Chemical Vapor Deposition
FOV	Field of View
NA	Numerical Aperture
PSA	Polarizer-Sample-Analyzer
PCSA	Polarizer-Compensator-Sample-Analyzer
PSCA	Polarizer-Sample-Compensator-Analyzer
SE	Spectroscopic Ellipsometry
RTSE	Real Time Spectroscopic Ellipsometry
ME	Micro Ellipsometry
MSE	Micro-Spectroscopic Ellipsometry
RMSE	Root Mean Square Error
BS	Beam Splitter
2D	Two Dimension
FPS	Frame Per Second
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor

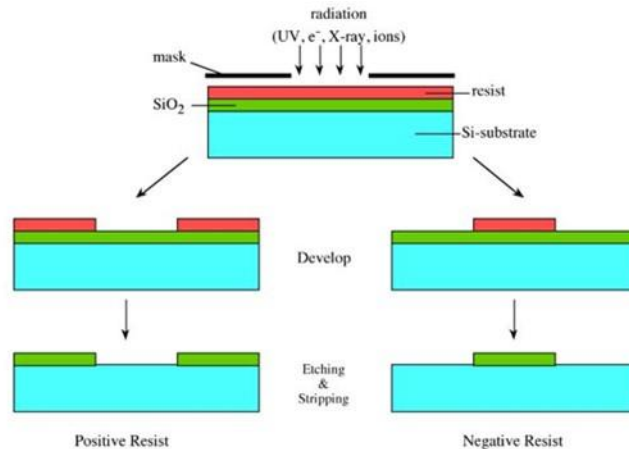
UV

Ultra Violet

제 1 장 서론

1.1. 연구 배경

디스플레이, 반도체를 비롯한 분야의 공정에서 박막 측정의 수요가 증가하고 있다. 흔히 패턴을 제작하기 위해 리소그래피(Lithography) 공정 및 식각(Etching) 공정을 이용하게 되는 데 이를 위해 사용되는 물질이 PR(Photo Resist)이다. PR을 패턴 형성을 원하는 층 위에 쌓은 다음 마스크를 덮고 빛을 쬌어서 PR 층에 패턴을 만든 후에 아래 층의 박막을 PR 패턴에 맞게 식각 할 수 있다. 여기서 PR의 두께에 따라 정확한 형상의 패턴 제조가 가능해 지기 때문에 PR의 두께를 정확하게 측정하고 관리할 필요가 있다.

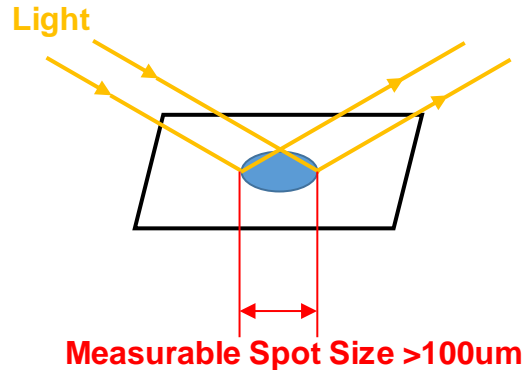


<그림 1.1 리소그래피 및 식각 공정>¹

¹ <http://archive.cnx.org/contents/2997481b-ecd7-4e38-9465-677d8adbe0ad@2/composition-and-photochemical-mechanisms-of-photoresists>

식각 공정을 위한 PR 막 형성 이외에도 절연 막과 전극 막 같은 박막은 CVD(Chemical Vapor Deposition) 공정을 이용해 물질을 증발시키고 기판에 증착 해서 제작을 한다. 여기서 CVD 챔버의 온도와 증발 속도 등에 따라 같은 물질 이라도 박막의 광학 상수가 달라진다. 광학 상수는 굴절률(Refractive Index, n)과 소광률(Extinction Coefficient, k)을 일컫는 용어으로써 박막의 특성을 결정하게 된다. 굴절률은 Si 나 In 등의 전기 전도성 원소 조성비에 비례하므로 이를 통해 박막의 전기 전도성을 알 수 있다. 소광률은 빛이 박막을 통과 할 때의 투과율에 영향을 준다. 그래서 박막의 두께 뿐만 아니라 박막의 성능을 평가하기 위한 광학 상수 측정의 필요성도 존재 한다.

디스플레이와 반도체 분야 모두 세대가 발전 할수록 패턴이 미세해지고 고집적화 되는 경향이 있다. 그래서 미세 패턴의 박막을 정확히 측정하는 것이 중요하다. 박막을 분석하는데 가장 정확도가 뛰어난 장비는 타원계(Ellipsometry)다. 이는 박막에 빛을 입사 시켜서 샘플을 맞고 나온 빛의 타원 편광 상태 변화를 분석해서 박막의 두께와 광학 상수를 측정 하는 장비이다. 전기장이 서로 수직으로 진동하는 두 빛 성분(p 파, s 파)의 진폭 변화 비와 위상 변화 차이를 알아야 하기 때문에 빛을 샘플에 비스듬하게 입사 시켜서 입사면을 정의해줘야 한다는 제약이 있다. 하지만 이는 샘플에 입사되는 빛의 영역을 크게 만드는 요소가 되어 미세 패턴을 측정 하는데 어려움이 많았다. 일반적인 타원계의 측정 스폿 영역은 최소 수 mm 정도 이며, 대물 렌즈를 조합하여 영역을 줄이려고 해도 비스듬한 축을 따라 초점을 맞추면 렌즈와 샘플 사이에 작동 거리(Working Distance)가 더 짧아지기 때문에 충돌 위험성이 존재한다. 이로 인해 광학계의 이송과 그에 따른 정렬이 힘들어지고, 디스플레이 기판 같은 대형 샘플을 측정 할 수 없다. 이 제약을 없애려면, 렌즈를 사용하더라도 저배율 밖에 사용 할 수 없어서 측정 스폿 영역이 최소 수백 μm 이상이 된다는 문제가 존재 했다.



<그림 1.2 빛을 비스듬하게 입사 시킬 때의 스팟 크기 제약>

그래서 현미경처럼 빛을 수직으로 입사 시키면서도 타원 편광 상태를 분석 할 수 있게 하여, 미세 패턴을 측정하기 용이한 타원계가 연구되고 있다. 이를 마이크로 타원계(Micro ellipsometry)라고 한다. 빛이 수직으로 입사 하더라도 실제로는 대물 렌즈의 개구수(Numerical Aperture)로 인해 빛이 비스듬하게 입사하는 원리를 이용한다. 결과 적으로 빛의 입사 경로와 반사 경로에 의해 입사면이 정의 될 수 있고 p 파와 s 파의 구분이 가능해진다. 이를 이용하여 p 파와 s 파의 진폭 변화 및 위상 변화를 감지해서 타원 편광 상태의 분석이 가능하다. 하지만 이제까지 연구된 마이크로 타원계의 경우 단파장의 광원만 이용을 했기 때문에 박막 특성의 미세한 변화에 따른 신호의 분별력이 크지 않았다. 결과적으로 측정의 분해능이 떨어졌으며 정확도에서 문제가 많았다.

위와 같은 상황에서 측정 할 수 있는 샘플 크기의 제약이 없으면서도, 100um 이하 미세 패턴의 박막 두께와 광학 상수를 동시에 높은 분해능으로 정확하게 측정 할 수 있는 타원계가 아직은 존재 하지 않으며 필요성이 대두되고 있다.

1.2. 연구 동향

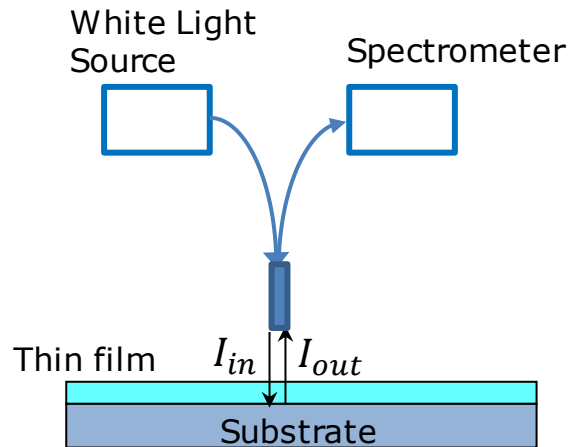
1.2.1. 반사계

일반 적인 산업 현장 에서 박막 측정에 많이 사용 되는 장비는 반사계(Reflectometry)이다[1-12]. 반사계는 빛의 입사, 반사에 의한 광 강도 비로 표현되는 반사도를 구하고 이를 이론적인 신호와 비교 하여 두께를 측정 하는 장비이다. 빛의 편광 상태 변화를 고려할 필요가 없어서 광학계의 구조가 간단 하고, 수직 입사와 고 배율 렌즈를 이용해 작은 영역에 빛이 입사 될 수 있어서 미세 패턴의 박막 측정이 용이하다는 장점이 있다. 특히 수직 입사는 빛이 높은 투과율로 박막을 통과 할 수 있게 해서 두꺼운 범위의 박막 측정이 가능하다.

반사도 신호를 왜곡 시킬 수 있는 여러 요소를 고려하고 실제 광학계의 조건에 맞게 반사도 신호를 정확히 모델링 하고 분석 할 수 있는 연구들이 진행 되어 왔다. 보통 백색 광원을 샘플에 입사 시킨 다음 반사된 빛을 스펙트로미터(Spectrometer)로 받아서 분광 스펙트럼을 얻는 분광 반사계(Spectroscopic Reflectometry)나[1-3] 백색광을 단파장으로 분리할 수 있는 모노크로메이터(Monochromator)와 2D 센서를 조합해 픽셀 별로 다파장에 대한 신호를 얻고 두께를 측정 하는 이미징 반사계(Imaging Reflectometry)가[4-10] 많이 사용된다. 분광 반사계는 대물 렌즈와의 조합으로 측정 영역의 크기를 줄일 수 있으며($>1\mu\text{m}$), 이미징 반사계는 대물 렌즈와 빛을 픽셀 별로 쪼개서 분석하는 방식의 조합으로 더 작은 패턴($>100\text{nm}$)의 측정이 가능하다.

하지만 반사도 신호는 타원계에서 사용하는 타원 편광 신호에 비해 여러 변수를 동시에 측정 하기에는 민감도가 떨어지는 문제가 있으며, 그래서

타원계 보다 두께와 광학 상수의 측정 분해능 및 정확도가 떨어진다는 단점이 있다.



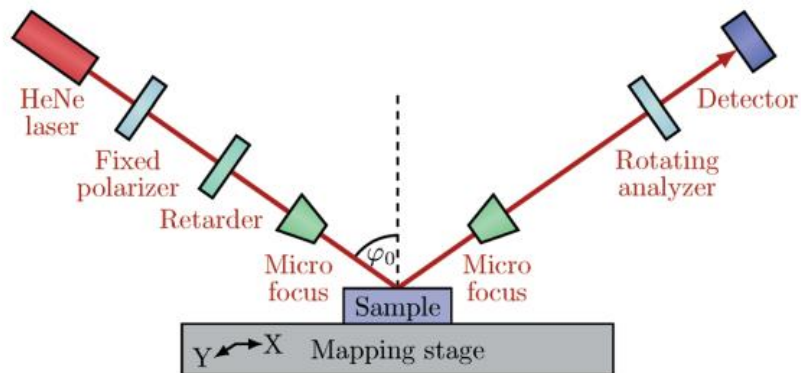
<그림 1. 3 일반적인 분광 반사계 개요도>

1.2.2. 타원계

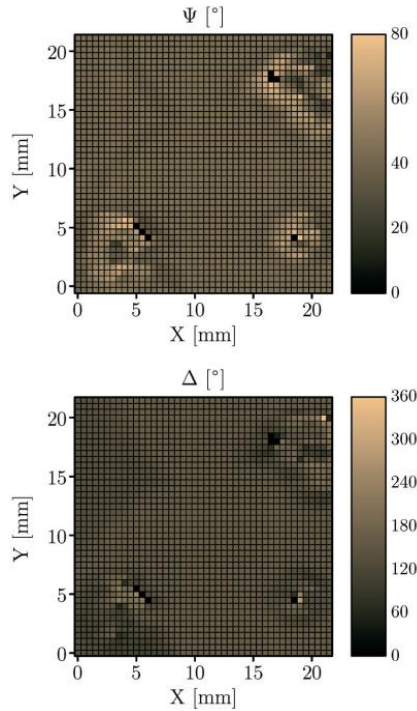
빛을 샘플에 비스듬하게 입사 시켰을 때 빛의 입사 경로와 반사 경로에 의해 빛의 입사 면이 정의 된다. 전기장의 진동 방향은 빛의 진행 방향에 대해 수직이 되는데 여기서 입사면과 평행한 전기장 성분을 p 파, 수직인 성분을 s 파라 한다. p 파와 s 파는 샘플을 맞고 반사되면 서로 독립 적으로 진폭 및 위상이 달라진다. 그래서 일반적으로 선형 편광 되었으면서도 p 파와 s 파 성분을 모두 가지고 있는 빛을 샘플에 비스듬하게 입사 시키면 반사된 빛은 타원 편광이 된다. 이러한 현상을 토대로, 타원계는 샘플을 맞고 반사

된 빛에서 p 파와 s 파의 상대 진폭 변화 비 및 위상 변화 차를 의미하는 타원 파라미터를 분석하여 타원 편광 상태를 해석하고 이론 적인 신호와 비교 해서 박막의 두께 및 광학 상수 측정을 할 수 있는 장비이다[13-15].

하지만 빛을 비스듬하게 입사 시키기 때문에 샘플 면에 맺히는 빛의 스팟 영역이 일반적으로 수 mm 정도가 되고, 그래서 μm 스케일의 미세 패턴 분석이 힘든 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 빛의 경로에 대물 렌즈를 추가 해서 샘플에 입사되는 빛의 영역을 최소화 시켜주거나[16,17], 반사 된 빛을 감지하는 센서로 2D 카메라를 사용하여 그 빛을 여러 픽셀로 분리하여 해석 하는 방법이 있으며[18-23], 혹은 두 가지를 다 조합해서[24-30] 미세 패턴의 박막을 측정 하는 연구가 많이 진행 되어 왔다.



<그림 1. 4 일반적인 타원계에 대물 렌즈, 2D 카메라를 조합한 방법
[29]>



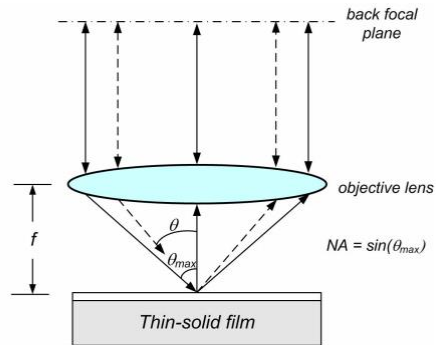
<그림 1. 5 2D 카메라의 픽셀 별 분석을 통한 수평 방향 분해능 향상
[29]>

하지만 비스듬한 축으로 렌즈의 포커스를 맞추다 보면 렌즈 하단과 샘플 사이의 작동 거리가 더욱 짧아지는 문제가 있다. 그래서 렌즈와 샘플의 충돌 위험성으로 인해 개구수가 큰 고배율 렌즈 사용이 불가능하고, 줄일 수 있는 측정 스팟 영역에 한계가 있다. 렌즈 없이 2D 카메라를 사용 하면 같은 구조와 재료로 이루어진 대면적 박막 영역의 특성 분포를 높은 수평 방향 분해능으로 얻는 데는 유리 하지만, 원하는 미세 패턴만을 정확히 정렬해서 측정 하는 것이 힘들다. 또한 렌즈와 2D 카메라를 조합하는 경우는 비스듬한 광 축으로 인해 이미지가 왜곡 되는 문제가 있고, 전체 이미지 영역의 포커스를 동시에 맞출 수 없기 때문에 픽셀 위치 별로 이송을 하면서 측정해야 하는 문제도 존재한다.

1.2.3. 마이크로 타원계

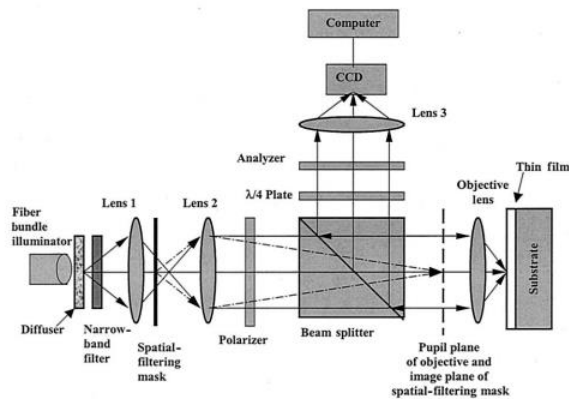
타원계는 빛의 p 파와 s 파를 구분 할 수 있어야 하기 때문에 일반적으로 빛을 비스듬하게 입사 시켜서 입사면이 정의 될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 하지만 이를 위해 고니오미터(Goniometer)를 사용하여 발광 부와 수광 부를 샘플 면으로부터 일정 각도에 맞춰서 별개로 배치해야 되기 때문에 광학계의 정렬이 까다로워지고 부피가 커져서 공간적인 제약이 생긴다. 그래서 기본적으로 광학계의 직접 이송과 그에 따른 정렬이 힘들기 때문에 디스플레이 기관 같은 대형 샘플의 여러 지점을 빠르게 측정 하는 것이 어렵다. 그리고 천천히 이송하면서 측정을 한다고 해도 샘플과의 충돌 위험성 때문에 고배율 대물 렌즈의 사용이 힘들어, 미세 패턴의 분석이 힘든 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 빛의 수직 입사를 이용하면서도 타원계와 같이 타원 편광 분석을 할 수 있는 방법들이 연구되고 있다. 이를 흔히 현미경 방식(Microscopic)을 이용하고, 미세 패턴을 측정 하기 용이하다는 장점 때문에 마이크로 타원계(Micro ellipsometry)라고 한다. 보통 대물 렌즈를 이용한 현미경 광학계에서 빛은 수직으로 입사 되지만 실제로는 렌즈의 개구수에 의해 다양한 각도로 비스듬하게 입사 되고 반사 된다<그림 1. 6>. 이러한 원리를 이용해 타원 편광 상태 해석을 할 수 있다. 그리고 발광 부와 수광 부를 분리할 필요가 없고 기울일 필요도 없기 때문에 광학계의 공간적 제약을 없앨 수 있다. 그래서 광학계의 이송이 편리해 대형 샘플의 여러 지점을 빠르게 측정 할 수 있다. 또한 수직 입사로 인한 긴 작동거리 확보가 가능해 100x 이상의 고배율 렌즈를 사용할 수 있으므로 샘플 면에 형성되는 빛의 영역 크기도 더욱 최소화 할 수 있으며 미세 패턴의 분석도 용이 해진다.



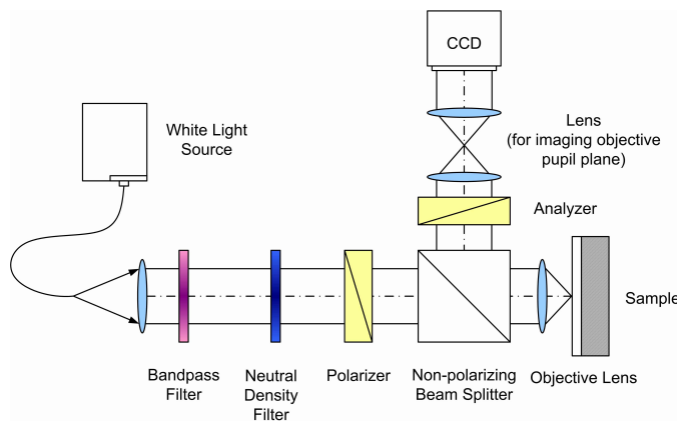
<그림 1. 6 대물 렌즈의 개구수로 인한 빛의 비스듬한 입사[38]>

우선 광학계에 들어가는 빛을 선형 편광 시키고 센서로 들어 오는 빛의 편광 상태를 몇 가지로 바꿔주면서 그에 따른 샘플 이미지의 광 강도 변화를 이용해 타원 파라미터를 산출 하고 타원 편광 분석을 할 수 있는 방법의 연구가 진행 되었다[31,32]. 고배율 렌즈의 사용에다가 이미지의 픽셀 별로 박막 측정을 할 수 있어서 미세 패턴 측정에 유리 했으며 무엇보다 2D 영역의 박막을 이송 없이 측정 할 수 있는 장점이 있었다. 하지만 한 쌍의 타원 파라미터 만을 고려하기 때문에 측정 분해능이 떨어지는 단점이 있었다.



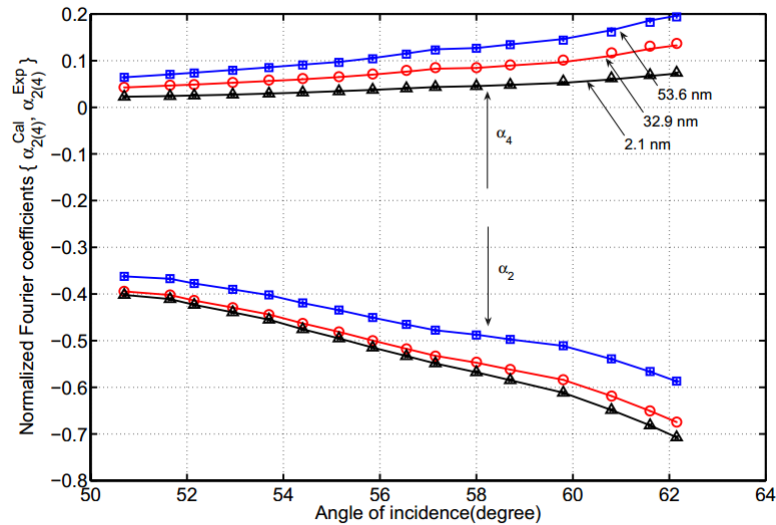
<그림 1. 7 샘플의 이미지를 이용한 마이크로 타원계[32]>

또한 선형 편광된 빛을 입사 시키고 대물 렌즈의 출사동(Exit pupil) 면의 광 강도를 분석하는 코노스코피(Conoscopy) 방식으로 타원 편광 상태를 분석할 수 있는 연구도 진행 되었다[33-42]. 이와 같은 방식 구현을 위해서 기존 연구 들에서는 <그림 1. 8>과 같이 빛의 발광 부와 수광 부에 편광판을 포함시키고, 출사동 면의 이미지를 2D 카메라로 얻을 수 있는 광학계를 구성했다. 그리고 개구수가 큰 대물 렌즈를 이용, 빛의 최대 입사각을 늘린 상황에서 한 축에 평행하게 편광 된 빛을 대물 렌즈를 통해 샘플로 입사 시켰다. 이때 편광 된 빛의 방향은 렌즈 상의 전 위치에서 일정한데 비해, 입사면은 렌즈 방위각의 변화에 따라 회전하기 때문에 방위각을 따라 p 파, s 파 비율이 다양하게 변하게 된다. 이러한 현상을 토대로 출사동 면의 방위각에 따른 광 강도 변화 분석을 통해 타원 파라미터를 산출 할 수 있는 방법을 제시 했다. 출사동의 반지름에 따라 빛의 입사각이 변화 하므로 다중 입사각에 대한 타원 편광 분석을 통해, 샘플의 이미지를 이용한 연구보다 박막을 좀더 높은 분해능으로 측정 했다.



<그림 1. 8 출사동 면의 광 강도를 이용한 마이크로 타원계[38]>

하지만 이제까지의 수직 입사 방식을 이용한 마이크로 타원계 연구는 광원으로는 단파장만을 사용하였고 한 쌍의 타원 파라미터 또는 다중 입사각에 대한 타원 파라미터들을 통해 박막의 특성을 측정하였다. 이러한 조건에서는 박막의 특성 변화에 따른 신호 변화가 크지 않아서 측정의 분해능이 떨어지는 단점이 있었다. <그림 1. 9>을 보면 다중 입사각에 대한 신호를 얻었음에도 불구하고 박막의 두께가 미세하게 변화 할 경우, 신호의 변화는 거의 일어나지 않는 것을 볼 수 있다.



<그림 1. 9 단파장 수직 입사 마이크로 타원계에서의 박막의 두께 미세 변화에 따른 신호의 분별력 부족[38]>

1.3. 연구 내용

기존의 수직 입사 방식을 이용한 마이크로 타원계에서는 단파장과 다중 입사각에 대한 신호를 이용한 분석만을 진행했다. 그래서 박막의 두께 및 굴절률 변화에 따른 타원 파라미터 신호 변화가 뚜렷하지 않아서 측정의 분해능이 떨어지는 문제가 있었다. 하지만 이를 백색 광원을 이용해 다파장에 대한 타원 파라미터를 얻게 되면 박막의 성질 변화에 따른 신호 변화가 뚜렷해지고 분석의 분해능이 올라가는 장점이 있다. 실제로 일반적인 타원계에서도 처음에는 단파장을 사용하다 다파장을 사용하는 원리로 발전했으며[43] 지금은 다파장을 이용한 해석이 보편적이다.

이번 연구에서는 수직 입사 광학계와 다파장 광원을 사용하고 코노스코피 방식을 이용한 마이크로 분광 타원계(Micro-spectroscopic ellipsometry)를 개발 했다. 광학계를 구성하기 위한 부품들을 선정하고 제작을 했으며 측정되는 광 강도 신호를 이용해, 타원 파라미터를 분석하고 박막 특성을 측정하는 방법을 제시 했다. 그리고 실제 산업에서 제조 되는 샘플들을 측정 하고 이를 기존 고성능 분광 타원계의 측정 결과와 비교하여 측정 성능을 검증 하였다.

제 2 장 타원계 기본 배경 이론

2.1. 기본 광학 이론

타원계 이론에는 박막에서의 빛의 굴절과 반사에 대한 이해가 필요하다. 우선 해당 현상에 대한 기본 광학 이론을 언급 한다[13-15].

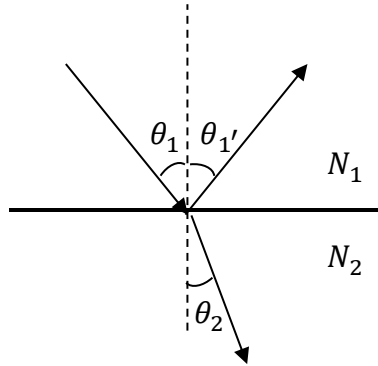
2.1.1. 빛의 굴절과 반사

빛이 한 매질에서 다른 매질로 비스듬하게 입사 할 때 경계면에 수직인 직선을 기준으로 한 입사각과 굴절각 사이의 관계는 Snell 의 법칙을 따른다.

$$N_1 \sin \theta_1 = N_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

그리고 입사각과 반사각 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\theta_1 = \theta_1' \quad (2.2)$$



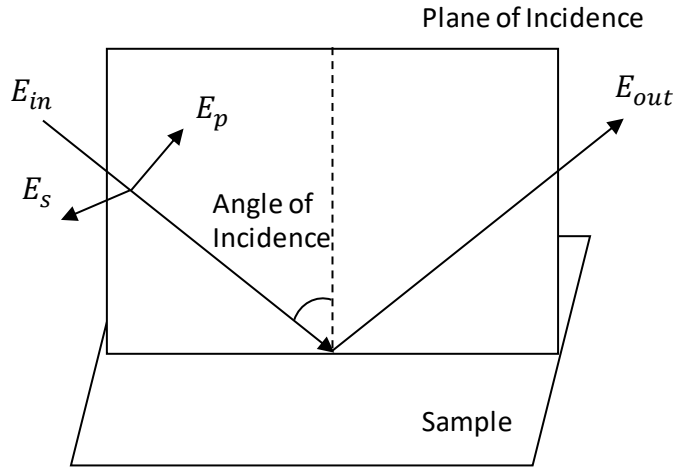
<그림 2. 1 서로 다른 두 매질 사이에서의 빛의 입사와 굴절 및 반사>

여기서 N_1 , N_2 는 각 매질의 광학 물성치로써 복소 굴절률이라고 한다. 이는 실수부인 굴절률(Refractive index, n)과 허수부인 소광률(Extinction Coefficient, k)로 이루어져 있는 데, 이것들이 박막의 성능을 검증 하기 위해 측정이 요구 되는 광학 상수이다.

$$N = n - jk$$

(2.3)

빛이 물질에 비스듬하게 입사 할 때는 빛의 입사 경로와 반사 경로로 입사면이 정의 될 수 있다. 여기서 빛의 전기장은 빛의 진행 방향의 수직으로 진동하게 되는데 입사면에 평행한 방향으로 진동하는 전기장 성분을 p 파, 수직인 성분을 s 파로 정의 할 수 있다.



<그림 2.2 빛의 반사에서 입사 면과 p파, s파의 정의>

빛이 두 매질 사이에서 반사될 때의 진폭과 위상 변화는 프레넬 반사계수로 표현되는데 이는 p 파와 s 파가 서로 다르게 표현된다.

$$r_{12,p} = \frac{E_{out,p}}{E_{in,p}} = \frac{N_2 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_2}{N_2 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_2} = |r_{12,p}| e^{i\delta_{r_{12,p}}} \quad (2.4a)$$

$$r_{12,s} = \frac{E_{out,s}}{E_{in,s}} = \frac{N_1 \cos \theta_1 - N_2 \cos \theta_2}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2} = |r_{12,s}| e^{i\delta_{r_{12,s}}} \quad (2.4b)$$

그리고 빛이 두 매질 사이를 투과 할 때의 진폭과 위상 변화를 나타내는 프레넬 투과 계수는 다음과 같다

$$t_{12,p} = \frac{2N_1 \cos \theta_1}{N_2 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_2} = |t_{12,p}| e^{i\delta_{t_{12,p}}} \quad (2.5a)$$

$$t_{12,s} = \frac{2N_1 \cos \theta_1}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2} = |t_{12,s}| e^{i\delta_{t_{12,s}}} \quad (2.5b)$$

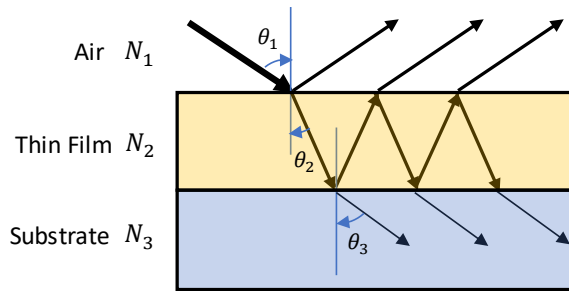
반사도는 물질에 입사 하는 빛과 반사 되는 빛의 광 강도 비로 표현 되는데 광 강도는 전기장의 진폭의 제곱에 비례하기 때문에 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\mathfrak{R}_p = \frac{I_{out,p}}{I_{in,p}} = |r_p|^2 \quad (2.6a)$$

$$\mathfrak{R}_s = \frac{I_{out,s}}{I_{in,s}} = |r_s|^2 \quad (2.6b)$$

2.1.2. 박막에서의 다중 반사 이론

기판 위에 박막이 쌓여 있는 샘플에 빛이 입사되고 반사될 때 일반적으로 다음과 같은 다중 반사 현상이 생긴다.



<그림 2. 3 박막에서의 빛의 다중 반사>

빛이 매질 사이 경계에서 반사될 때의 위상 변화는 앞 절에서의 프레넬 반사 계수(식 2.4)를 따르며 투과 될 때의 위상 변화는 프레넬 투과 계수(식 2.5)를 따른다. 박막 매질을 한번 통과 할 때의 위상 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = kdN_2 \cos \theta_2$$

(2.7)

k 는 파수(Wave number, $2\pi/\lambda$)를 나타내며 λ 는 빛의 파장이고 d 는 박막의 두께를 의미한다. N_2 는 박막의 복소 굴절률이며, θ_2 는 빛이 박막으로

진입 할 때의 굴절각이다. <그림 2. 3>에 표시된 빛의 광 경로를 따라 총 반사 계수를 구하면 다음과 같은 무한 급수의 형태로 표현 된다.

$$\begin{aligned}
 R &= r_{12} + t_{12}r_{23}t_{21}e^{-i2\beta} + t_{12}r_{23}r_{21}r_{23}t_{21}e^{-i4\beta} + t_{12}r_{23}r_{21}r_{23}r_{21}r_{23}t_{21}e^{-i6\beta} + \dots \\
 &= r_{12} \\
 &\quad + t_{12}r_{23}t_{21}e^{-i2\beta} \left\{ 1 + r_{21}r_{23}e^{-i2\beta} + (r_{21}r_{23}e^{-i2\beta})^2 + (r_{21}r_{23}e^{-i2\beta})^3 \right. \\
 &\quad \left. + \dots \right\} = r_{12} + \frac{t_{12}r_{23}t_{21}e^{-i2\beta}}{1 - r_{21}r_{23}e^{-i2\beta}}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

여기서 투과 계수를 (식 2.4)와 (식 2.5)를 이용하여 반사 계수에 대한 식으로 정리하고 (식 2.8)에 대입하면 다음과 같은 총 반사 계수가 나온다.

$$R = \frac{r_{12} + r_{23}e^{-i2\beta}}{1 + r_{12}r_{23}e^{-i2\beta}}
 \tag{2.9}$$

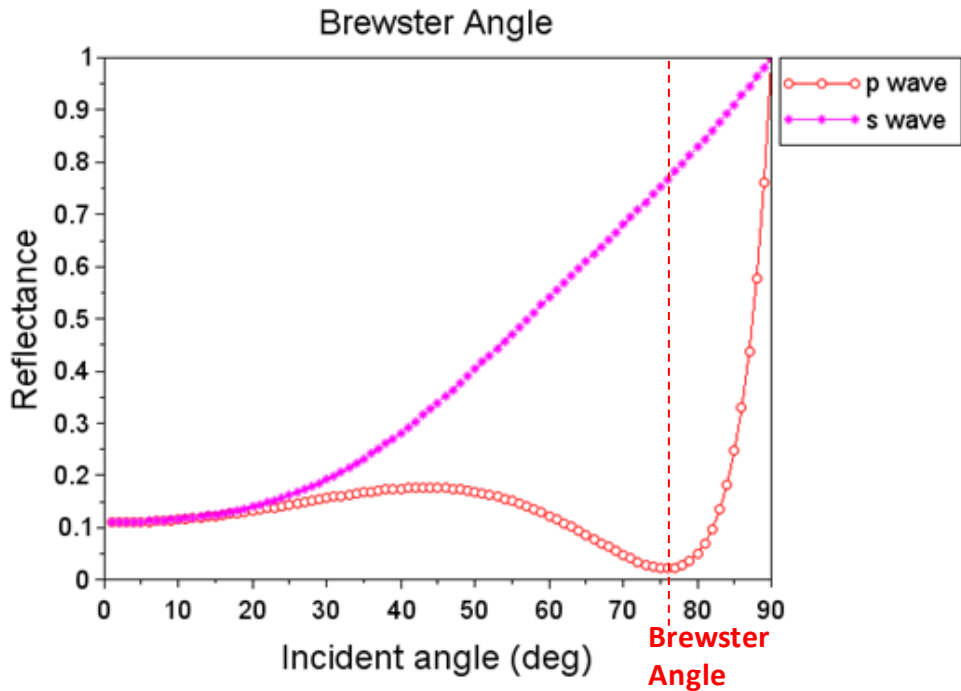
p 파와 s 파에 대한 프레넬 계수가 서로 다르듯이 총 반사 계수도 서로 다르기 때문에 다음과 같이 따로 표현 될 수 있다.

$$R_p = \frac{r_{12,p} + r_{23,p}e^{-i2\beta}}{1 + r_{12,p}r_{23,p}e^{-i2\beta}} = |R_p|e^{i\delta_{R_p}} \quad (2.10a)$$

$$R_s = \frac{r_{12,s} + r_{23,s}e^{-i2\beta}}{1 + r_{12,s}r_{23,s}e^{-i2\beta}} = |R_s|e^{i\delta_{R_s}} \quad (2.10b)$$

2.1.3. Brewster Angle

앞에서 본 대로 p 파와 s 파의 반사 계수와 반사도는 서로 다른 값을 가진다. 이는 샘플 별로 빛의 입사각이 변화 할수록 양상이 달라 진다. 632nm 파장의 빛이 공기에서 Si 기판 ($N = 3.9 + 0.213i$) 위에 SiO_2 ($N = 1.468 + 0i$)가 3000Å 쌓여 있는 박막으로 입사 된다고 할 때, 빛의 입사각을 변화 시켜 가며 p 파와 s 파의 반사도를 구한 그래프는 다음과 같다.



<그림 2. 4 다양한 입사각에 따른 반사도 그래프와 Brewster Angle>

<그림 2. 4>에서 보이듯이 p 파의 반사도가 최소가 되어서 p 파, s 파의 반사도 차이가 최대가 되는 입사각(약 76°)이 존재 하는데 이를 Brewster Angle 이라고 정의 한다. 타원계에서는 p 파와 s 파의 진폭 비 및 위상 차를 구하기 위해 두 신호를 구분 하는게 중요한데, 입사각을 Brewster Angle 로 설정하고 측정 하게 되면 p 파와 s 파의 신호 구분이 뚜렷해져서 분석이 용이 해진다. 그리고 입사각이 30° 이하로 작을 경우에는 p 파와 s 파의 구분이 어려워 지기 때문에 타원 편광 상태를 분석하는게 힘들어 진다.

다양한 물질의 분석을 용이하게 하기 위해서는 보통 60° 이상의 입사각을 확보하는 것이 좋다.

2.1.4. 타원 파라미터

타원계에서는 샘플에 반사되어 나온 빛의 타원 편광 상태를 분석한다. 여기서 p 파와 s 파의 상대 적인 진폭 변화 비와 위상 변화 차를 고려 하게 되는데 앞에서 소개한 (식 2.10)를 이용하여 총 반사 계수비를 구할 수 있다.

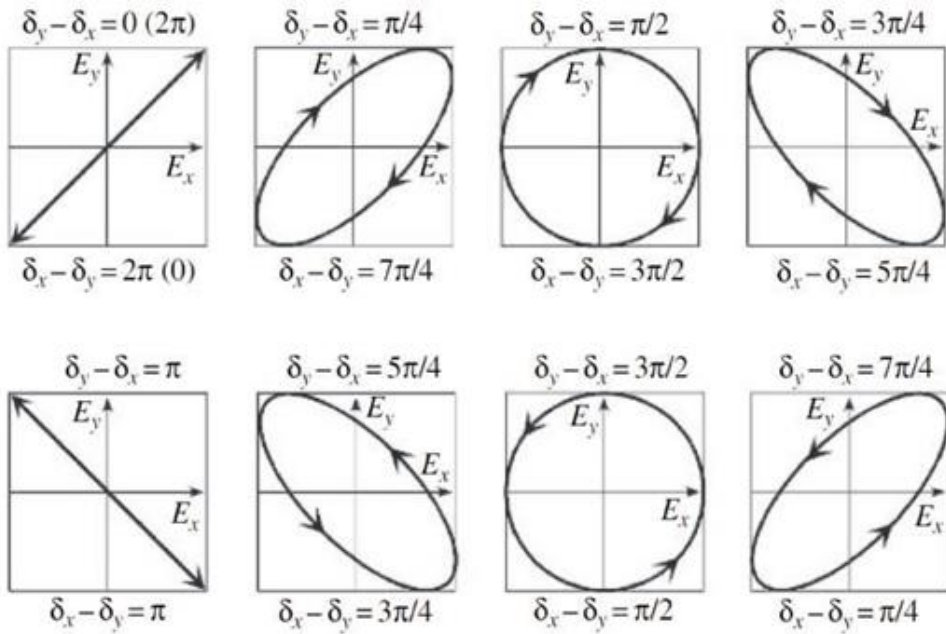
$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \frac{|R_p|}{|R_s|} e^{i(\delta_{R_p} - \delta_{R_s})} = \tan \psi e^{i\Delta} \quad (2.11)$$

이로부터 다음과 같은 타원 파라미터가 정의 될 수 있다.

$$\psi = \tan^{-1} \left| \frac{R_p}{R_s} \right| \quad (2.12a)$$

$$\Delta = \delta_{R_p} - \delta_{R_s} \quad (2.12b)$$

(식 2.12a)은 빛이 샘플에 맞고 반사될 때의 p 파와 s 파의 진폭 변화 비를 나타내고 (식 2.12b)는 p 파와 s 파의 위상 변화량 차를 의미한다. 타원 파라미터 값에 따른 빛의 편광 상태는 다음과 같다.



<그림 2. 5 타원 파라미터에 따른 빛의 편광 상태>²

위 그림에서 $\delta_y - \delta_x$ 는 (식 2.12b)의 Δ 를 의미하는데 p 파와 s 파의 진폭이 같다고 가정했을 때($\psi = \frac{\pi}{4}$), Δ 의 절대값이 $0, \pi, 2\pi$ 일 경우 빛은 선형 편광이 일어나고, $\pi/2, 3\pi/2$ 일 경우 원형 편광이 일어나며 그 외의 경우 타원 편광이 일어나게 된다.

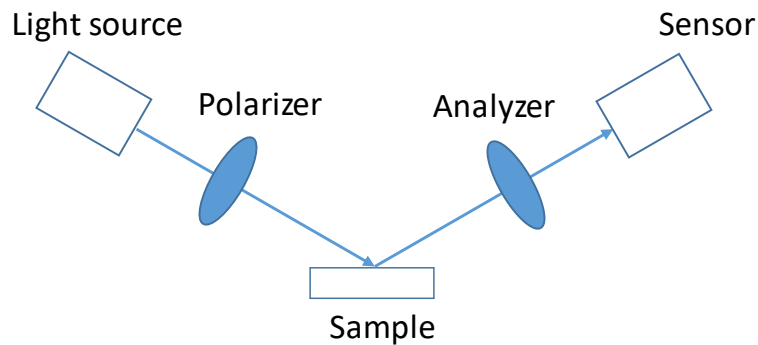
타원계에서는 위와 같은 타원 파라미터를 측정한 다음 이론 값과의 비교를 통하여 박막의 특성을 분석한다.

² http://www.kristoflodewijks.be/?page_id=262

2.2. 타원계

2.2.1. 기본 적인 타원계의 구성

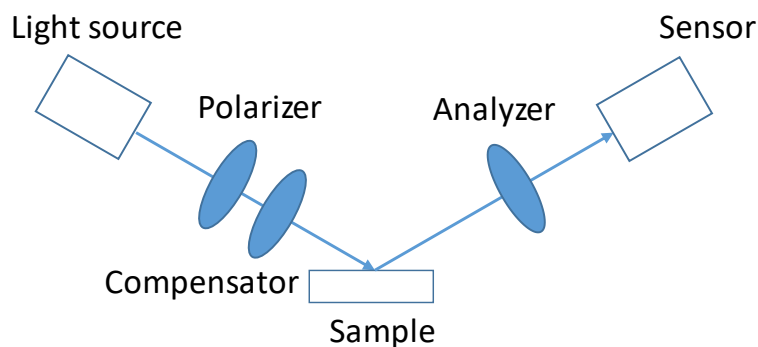
일반적으로 타원계는 빛의 입사면을 정의 할 수 있어야 한다. 그리고 샘플에 맞고 나온 빛의 타원 편광 상태를 분석 하기 위해서 샘플 전후에 편광판으로 이루어진 Polarizer 와 Analyzer 를 위치 시켜야 한다. 기본적인 타원계의 구성은 다음과 같다[13-15].



<그림 2. 6 PSA형 타원계의 개요도>

광원으로부터 나온 빛은 Polarizer 를 지나고 샘플을 맞고 반사된 다음 Analyzer 를 지나서 센서에 감지 된다. 위와 같이 구성된 경우를 보통 PSA(Polarizer-Sample-Analyzer)형 타원계라고 한다.

일단 Polarizer 를 통해 선형 편광 된 빛은 샘플을 맞고 반사 될 때 타원 편광으로 바뀌게 된다. 그리고 Analyzer 를 통해서 센서로 들어 오는 빛의 광 강도를 통하여 타원 파라미터를 구할 수 있다. Polarizer 와 샘플 사이 또는 샘플과 Analyzer 사이에는 p 파나 s 파 중 한 성분의 위상만 지연 시켜 주는 Compensator 를 설치 할 수도 있다. 이를 PCSA(Polarizer-Compensator-Sample-Analyzer)형 또는 PSCA(Polarizer-Sample-Compensator-Analyzer)형 타원계라고 한다. 광학계의 구성에 따라 측정된 광 강도 신호를 통해 타원 파라미터를 산출 하는 방식이 달라진다.



<그림 2. 7 PCSA형 타원계의 개요도>

Polarizer 와 Analyzer 그리고 Compensator 를 수동으로 회전 시켜 가면서 센서로 들어오는 빛이 차단 되는 조건을 찾고 타원 파라미터를 산출 하는 null 형 타원계가 가장 기본적인이다. 하지만 단파장만 사용 할 수 있고 광학 부품을 직접 회전 시켜가며 빛이 차단 되는 조건을 찾아야 되기 때문에 측정 속도가 느린 단점이 있다. 그래서 일반적으로 다파장 광원을 사용 할 수 있으면서도 측정 시간이 빠른 회전형 Polarizer 타원계와 회전형 Analyzer 타원계 또는 회전형 Compensator 타원계를 많이 사용한다.

2.2.2. 타원 파라미터의 산출 방법

일단 PSA 형 타원계에서 Polarizer 가 회전하는 회전형 Polarizer 타원계를 기준으로 한다. <그림 2. 6>의 타원계 개요도에서 Polarizer 가 각속도 ω 로 회전 한다고 할 때 빛이 통과하는 경로를 따라 광원으로부터 나오는 전기장에 광학 부품의 편광 상태 변화를 표현하는 Jones Matrix 를 차례로 곱하면 센서에서 검출 되는 전기장을 구할 수 있다.

$$E_{out} = T_A T_S T_P E_{in} \quad (2.13)$$

E_{in} 은 광원으로부터 나온 빛이 Polarizer 를 통과 한 직후의 전기장이며 편광판을 통과했기 때문에 한 축의 성분만 존재한다.

$$E_{in} = \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.13a)$$

T_P 는 Polarizer 에 의한 편광 상태 변환 행렬, T_S 은 샘플면에서의 반사에 의한 변환 행렬, T_A 는 Analyzer 에 의한 변환 행렬이다.

$$T_P = R(-(\omega t - P)) \quad (2.13b)$$

$$T_S = \begin{pmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_s \end{pmatrix} \quad (2.13c)$$

$$T_A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} R(A) \quad (2.13d)$$

P 는 입사면으로부터 Polarizer 의 초기 오프셋 각이며 A 는 Analyzer 의 오프셋 각이다. 행렬 R 은 좌표계 회전 변환 행렬을 나타낸다.

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.13e)$$

(식 2.13)를 전개 하면 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
E_{\text{out}}(\omega) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} R(A) \begin{pmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_s \end{pmatrix} R(-(\omega t - P)) \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\omega t - P) & -\sin(\omega t - P) \\ \sin(\omega t - P) & \cos(\omega t - P) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} R_p E_0 \cos(\omega t - P) \cos A + R_s E_0 \sin(\omega t - P) \sin A \\ R_p E_0 \cos(\omega t - P) \cos A + R_s E_0 \sin(\omega t - P) \sin A \end{pmatrix}
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

Polarizer 의 회전에 따라 감지되는 광 강도는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$I(\omega) = |E_{\text{out}} \cdot E_{\text{out}}^*| \tag{2.15}$$

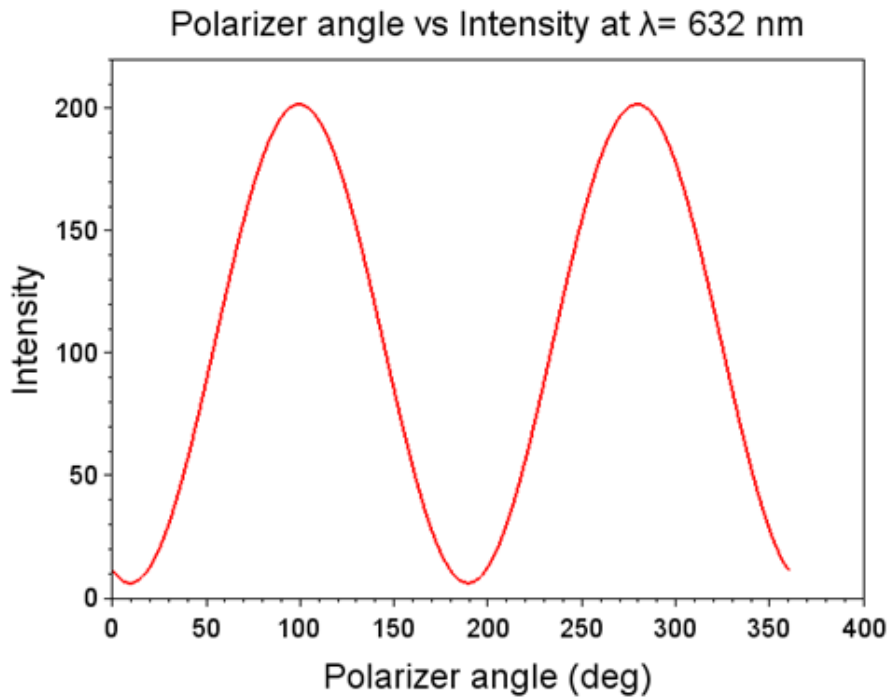
$R_p = |R_p|e^{i\delta_{R_p}}$, $R_s = |R_s|e^{i\delta_{R_s}}$ 을 대입하여 전개 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
I(\omega) &= \frac{1}{2} |E_0^2| |R_s|^2 \cos^2 A (\tan^2 \psi + \tan^2 A) \left[1 + \left\{ \frac{\tan^2 \psi - \tan^2 A}{\tan^2 \psi + \tan^2 A} \right\} \cos 2(\omega t - P) \right. \\
&\quad \left. + \frac{2 \tan \psi \tan A \cos \Delta}{\tan^2 \psi + \tan^2 A} \sin 2(\omega t - P) \right] \\
&= \frac{1}{2} |E_0^2| |R_s|^2 \cos^2 A (\tan^2 \psi + \tan^2 A) [1 + \alpha \cos 2(\omega t - P) + \beta \sin 2(\omega t - P)]
\end{aligned}
\tag{2.15a}$$

$$\alpha = \frac{\tan^2 \psi - \tan^2 A}{\tan^2 \psi + \tan^2 A}
\tag{2.15b}$$

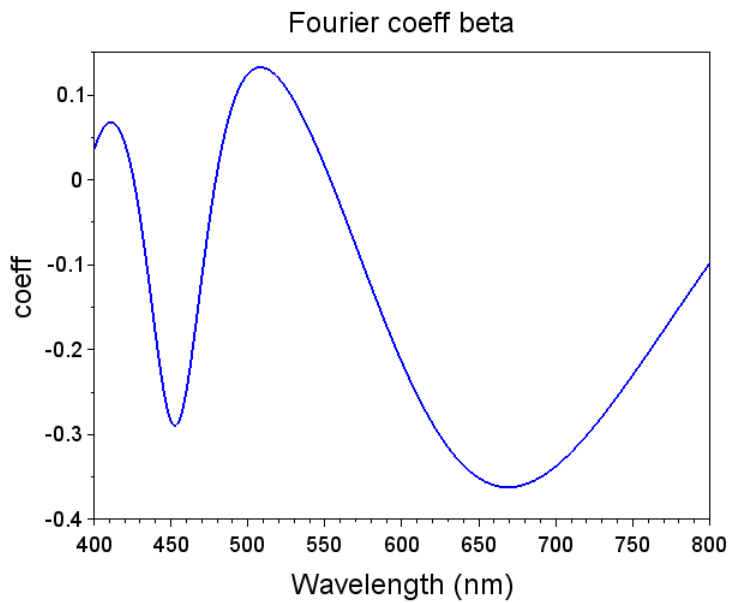
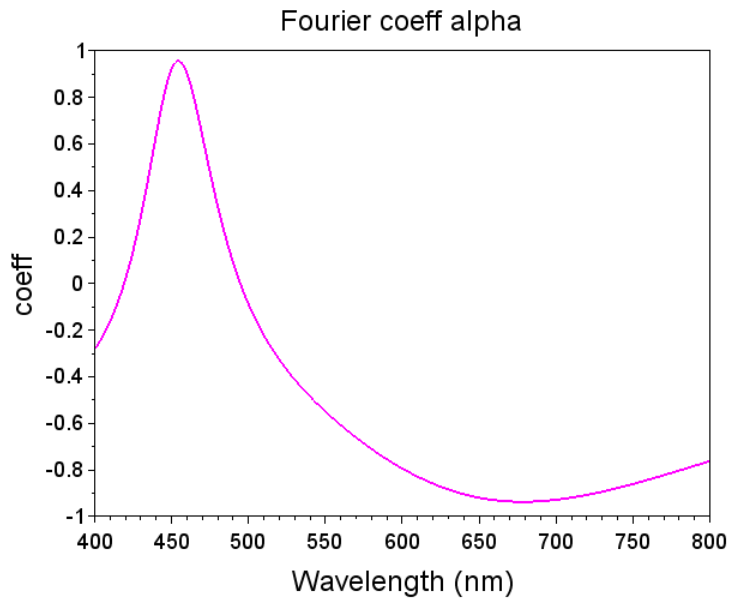
$$\beta = \frac{2 \tan \psi \tan A \cos \Delta}{\tan^2 \psi + \tan^2 A}
\tag{2.15c}$$

결국 광 강도는 푸리에 급수 형태로 표현이 되며 Polarizer 의 회전에 따른 주기 함수가 된다. <그림 2. 8>은 Si 기판 위에 SiO₂ 가 3000Å 쌓여 있는 박막에 632nm 파장의 빛을 70° 의 입사각으로 입사 시키고, Analyzer 의 각도를 45° 에 고정시킨 상태에서 Polarizer 를 회전 시켰을 때의 광 강도 변화 그래프이다.



<그림 2. 8 Polarizer의 회전에 따른 광 강도 변화>

(식 2.15)과 같이 푸리에 급수 형태의 주기 함수로 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이를 다파장 광원을 사용한다고 가정하고 여러 파장에 대한 푸리에 계수를 산출 하면 <그림 2. 9>의 데이터를 얻을 수 있다.



<그림 2. 9 다파장 광원에 따른 푸리에 계수 데이터>

그리고 (식 2.15b), (식 2.15c)에 따라 주기 함수의 푸리에 계수는 타원 파라미터에 관한 식으로 표현된다. 결국 측정된 푸리에 계수와 다음 식을 이용하면 박막의 타원 파라미터를 산출 할 수 있다.

$$\Delta = \cos^{-1} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \right) \quad (2.16a)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha}} \tan A \right) \quad (2.16b)$$

2.2.3. 타원 파라미터를 이용한 측정 결과 값 산출

우선 박막 특성의 측정을 위해선 Polarizer 의 회전에 따른 광 강도 주기 신호의 푸리에 계수를 얻고 (식 2.16)을 사용하여 타원 파라미터를 측정 신호로 얻는다. 그 다음 박막의 후보 두께 및 광학 상수(n, k)를 변수로 넣고 (식 2.12)를 사용해 이론 신호를 모델링 한 후 측정 신호와의 비교를 통해 서로가 가장 비슷한 경향을 보일 때의 변수 값들을 측정 결과 값으로 산출한다.

다과장에 대해서 타원 파라미터를 얻는다고 할 때 다음의 식을 최소화 시키는 두께 및 광학 상수의 변수 값을 측정 결과로 산출 한다.

$$\chi^2 = \sum_{\lambda=start}^{end} \left\{ \left(\psi_{measured}(\lambda) - \psi_{theory}(\lambda; d, n, k) \right)^2 + \left(\Delta_{measured}(\lambda) - \Delta_{theory}(\lambda; d, n, k) \right)^2 \right\} \quad (2.17)$$

그리고 위의 수식을 최소화 시킬 수 있는 조건을 찾기 위해 일반적으로 Levenberg-Marquardt 같은 비선형 피팅 알고리즘을 사용한다.

2.3. 마이크로 타원계

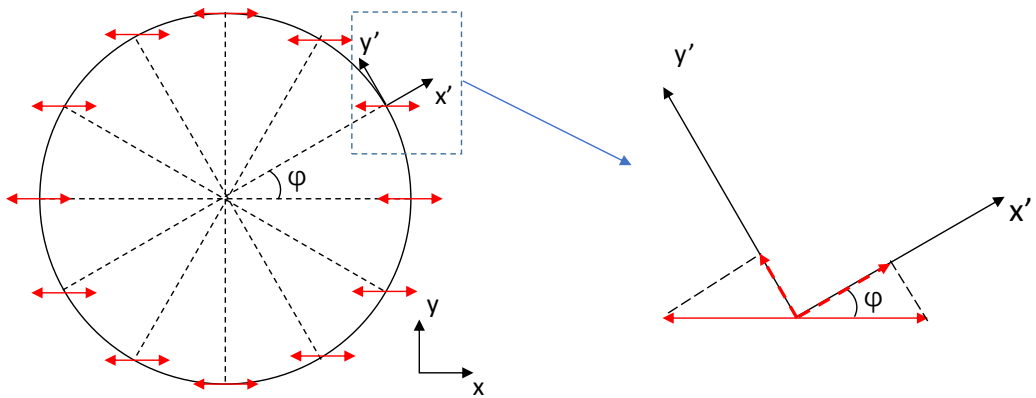
2.3.1. 마이크로 타원계의 기본 원리

마이크로 타원계는 일반적인 현미경처럼 빛의 수직 입사 방식을 이용한다[31-42]. 빛이 수직으로 입사 하지만 실제로는 대물 렌즈의 개구수에 의해 빛이 비스듬하게 입사하는 현상을 통해 입사면을 정의 할 수 있고 p 파와 s 파 성분 구별을 가능하게 해준다. 이를 통해 수직 광학계를 사용하면서도 일반적인 타원계와 똑 같은 기능을 할 수 있다. 마이크로 타원계에도 다양한 방식이 존재하지만 여기 서부터는 이번 연구에 응용된 코노스코피 방식을 이용한 마이크로 타원계만을 다룬다.

<그림 2. 10>은 광학계에 x 축 방향으로 선형 편광 된 빛을 입사 시켰을 때의 대물 렌즈의 윗면에서 바라본 빛의 편광 상태를 나타낸 것이다. 수평 화살표 선은 각 원호로 입사되는 편광 된 빛을 나타내며 원 중심을 가로지르는 점선들은 각 원호에서의 입사면이다. 입사면에 평행한 성분이 p 파이고 수직인 성분이 s 파라는 정의에 따라 0° 방위각 상에 있는 성분은 p 파만 입사되고 반사되며, 90° 방위각 상에 있는 성분은 s 파만 입사되고 반사된다는 것을 알 수 있다.

이제 0° 와 90° 사이 방위각에 존재하는 빛을 살펴보자. 방위각 φ 위치의 빛을 봤을 때(점선 사각형) 입사면을 기준으로 x' y' 좌표계를 새롭게 정의 한다고 하면 x' 축 성분의 전기장을 가지는 빛은 p 파, y' 축 성분의 전기장을 가지는 빛은 s 파가 된다. 결국 해당 위치의 빛은 새로운 좌표계 기준으로 p 파, s 파 성분을 모두 가지는 것을 볼 수 있다. 이 지점에서 입사된 빛은 샘플에 반사되고 나면 타원 편광 상태의 빛이 된다. 0° 와 90° 사이 방위각을 연속적으로 이동 하면서 살펴 보면 p 파와 s 파가 1:0에서

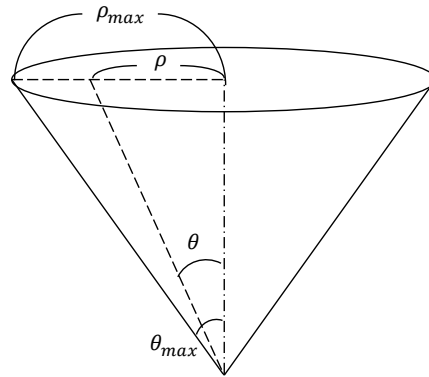
0:1 까지 다양한 비율로 입사 및 반사 되는 것을 알 수 있다. 결국 원호를 따라 편광 상태의 변화가 일어나며 이는 앞 절의 회전형 Polarizer 타원계에서 Polarizer 를 회전 시키는 효과와 비슷하다.



<그림 2. 10 대물 렌즈의 방위각에 따른 빛의 편광>

이때 빛의 입사각은 렌즈 중심으로부터의 거리에 따라 결정 된다. 빛의 최대 입사각은 렌즈 개구수에 의해 결정 되기 때문에 $\theta_{max} = \sin^{-1}(NA)$ 가 된다. 렌즈 윗면의 최대 반지름을 ρ_{max} 라고 할 때 중심에서 ρ 만큼 떨어진 빛의 입사각은 다음 식과 같다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\rho}{\rho_{max}} \sin \theta_{max}\right) \quad (2.18)$$

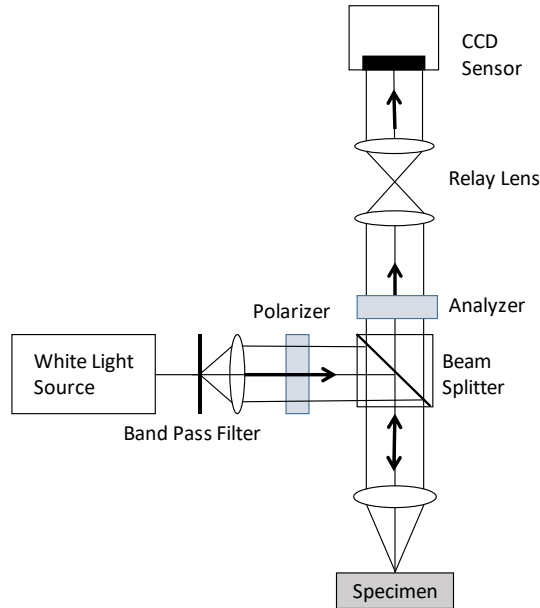


<그림 2. 11 대물 렌즈 중심으로부터의 거리에 의한 빛의 입사각 변화>

위와 같은 원리에 의해 대물 렌즈의 출사동 이미지를 획득하고 원하는 입사각에 부합되는 반지름을 선택한 다음, 방위각에 따른 광 강도 변화를 분석하면 타원 파라미터를 측정 할 수 있다. 구체적인 방법은 다음 절에 제시하였다.

2.3.2. 마이크로 타원계에서의 타원 파라미터 산출

수직 입사 방식과 코노스코피 원리를 이용하는 마이크로 타원계는 보통 다음과 같은 구성으로 이루어져 있다.



<그림 2. 12 일반적인 수직 입사 코노스코피 마이크로 타원계의 개요도>

광원으로는 단파장 광원을 사용하는데 단파장 광원을 직접 사용하거나 또는 백색광 광원과 특정 파장만 투과시키는 밴드 패스 필터(Band-pass Filter)를 조합하여 단파장의 광원을 만든다. 그리고 시준 렌즈(Collimating Lens)를 통과시켜서 평행광으로 만들어 준 다음에 편광판으로 되어있는 Polarizer 에 투과 시킨다. 투과된 빛은 빔 스플리터를 통해 대물 렌즈 쪽으로 향하며 대물 렌즈를 지나서 샘플면에 반사된 다음, 다시 대물 렌즈와 빔 스플리터를 거쳐서 수광부 쪽으로 가게 된다. 여기서 Polarizer 와 똑 같은 편광 판으로 구성 된 Analyzer 를 거친 후에 두 개의 튜브 렌즈로 구성되어 있는 릴레이 렌즈를 이용해 대물 렌즈의 출사동 이미지를 2D 카메라를 통해 획득하게 된다.

위 광학계의 대물 렌즈 출사동의 특정 반지름과 방위각 위치에서 검출 되는 전기장을 Jones Matrix 로 표현한 수식은 다음과 같다.

$$E_{\text{out}}(\theta, \varphi) = T_A R_\varphi T_S R_\varphi T_P E_{\text{in}} \quad (2.19)$$

E_{in} 은 광원으로부터 나오는 전기장을 나타내며 다음과 같다

$$E_{\text{in}} = \begin{pmatrix} E_{\text{in},x} \\ E_{\text{in},y} \end{pmatrix} \quad (2.19a)$$

T_A 는 Analyzer 에 의한 편광 상태 변환 행렬이며 자세한 식은 다음과 같다.

$$T_A = R(-A) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} R(A) \quad (2.19b)$$

R 은 좌표계 회전 변환 행렬을 나타내며 (식 2.13e)와 같다. A 는 입사면에 대한 Analyzer 축의 오프셋 각이다. T_A 를 살펴보면 기준 좌표계를 Analyzer 의 좌표 계로 변환 시켜 준 다음 Analyzer 축의 빛만 투과 시키고 다시 기준 좌표계로 변환 시켜주는 것을 알 수 있다. R_φ 는 렌즈의 방위각에 의한 좌표계 회전 변환 행렬이며 (식 2.13e)에 방위각 φ 을 대입한 것과 같다. T_S 는 샘플에서의 반사에 의한 편광 상태 변환 행렬이다. 이는 p 파와 s 파에 대한 총 반사 계수(식 2.10)를 포함한 행렬로 표현된다.

$$T_s = \begin{pmatrix} R_p(\theta) & 0 \\ 0 & R_s(\theta) \end{pmatrix} \quad (2.19c)$$

T_p 는 Polarizer 에 의한 편광 상태 변환 행렬이며 원리는 Analyzer 에 의한 변환 행렬과 같고, 입사면에 대한 Polarizer 축의 오프셋 각이 P 라고 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$T_p = R(-P) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} R(P) \quad (2.19d)$$

(식 2.19)를 이용해, Polarizer 의 각도 P 와 Analyzer 의 각도 A 가 모두 0° 의 위치에 있다고 할 때 결과적으로 산출되는 E_{out} 은 다음과 같다.

$$E_{out}(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} E_{out,x} \\ E_{out,y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{in,x} \{ R_p(\theta) \cos^2 \varphi - R_s(\theta) \sin^2 \varphi \} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

위 수식을 통해 출사동 면의 특정 입사각과 방위각에서 감지 되는 전기장을 구할 수 있는데 거기서의 광 강도는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$I(\theta, \varphi) = |E_{\text{out}}(\theta, \varphi) * E_{\text{out}}^*(\theta, \varphi)| \quad (2.21)$$

여기서 $R_p = |R_p|e^{i\delta_{R_p}}$, $R_s = |R_s|e^{i\delta_{R_s}}$ 을 (식 2.21)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻는다[38].

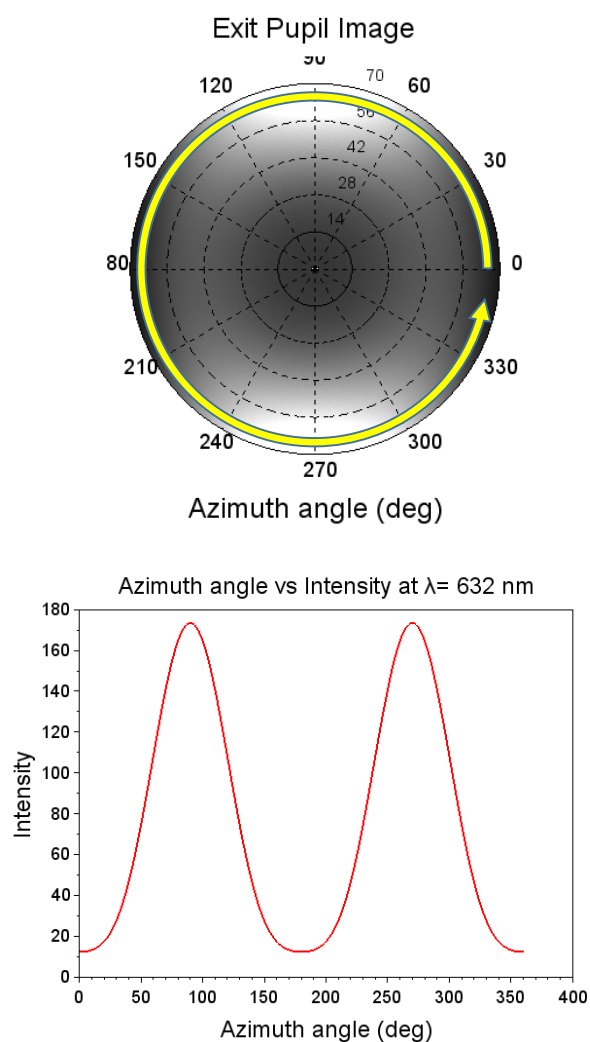
$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{8} |E_{\text{in},x}|^2 |R_s|^2 (3 \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta + 3) \{1 + \alpha_2 \cos 2\varphi + \alpha_4 \cos 4\varphi\} \quad (2.21a)$$

$$\alpha_2 = \frac{4 \tan^2 \psi - 4}{3 \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta + 3} \quad (2.21b)$$

$$\alpha_4 = \frac{\tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta + 1}{3 \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta + 3} \quad (2.21c)$$

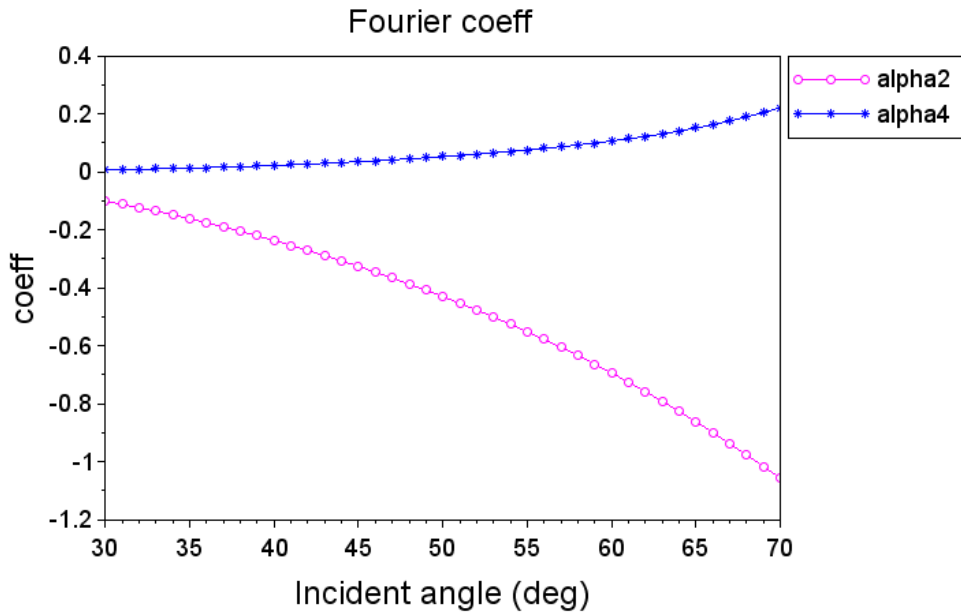
결국 출사동 이미지의 일정 반지름에서의 광 강도는 푸리에 급수 형태를 띠게 되어 방위각 (φ) 을 따라서 주기적으로 변하는 신호가 된다. <그림

2.13>은 Si 기판 위에 SiO_2 가 3000Å 쌓여 있는 박막에서 632nm 단파장의 빛을 사용할 때, 마이크로 타원계의 2D 카메라에 캡처 되는 출사동 이미지를 시뮬레이션하고 입사각 70° 의 반지름에서 방위각을 따라 얻은 광 강도 그래프이다. (식 2.21)에서 본 대로 광 강도가 푸리에 급수 형태의 주기 함수로 변하는 것을 볼 수 있다.



<그림 2.13 출사동 이미지에서 방위각에 따른 광 강도 변화>

광학계를 통해 얻은 출사동 이미지에서 방위각(φ)을 따라서 광 강도를 검출 한 다음, 주기 신호의 푸리에 계수를 구한다. 그리고 (식 2.21b, 2.21c)을 통해 모델링 된 푸리에 계수 신호와의 비교를 통해 샘플의 타원 파라미터를 분석하고 박막의 특성을 측정 할 수 있다. <그림 2. 14>는 앞서 <그림 2. 13>의 출사동 이미지에서 반지름에 따라 변하는 다양한 입사각에 대해 푸리에 계수들을 얻은 데이터를 나타낸다.



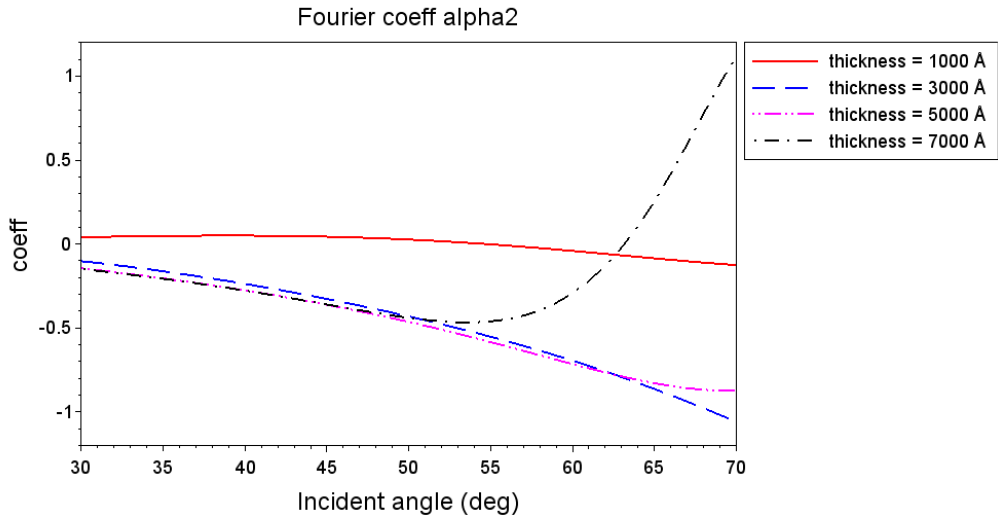
<그림 2. 14 다양한 입사각에 따른 푸리에 계수>

제 3 장 광원에 따른 마이크로 타원계 신호 시뮬레이션

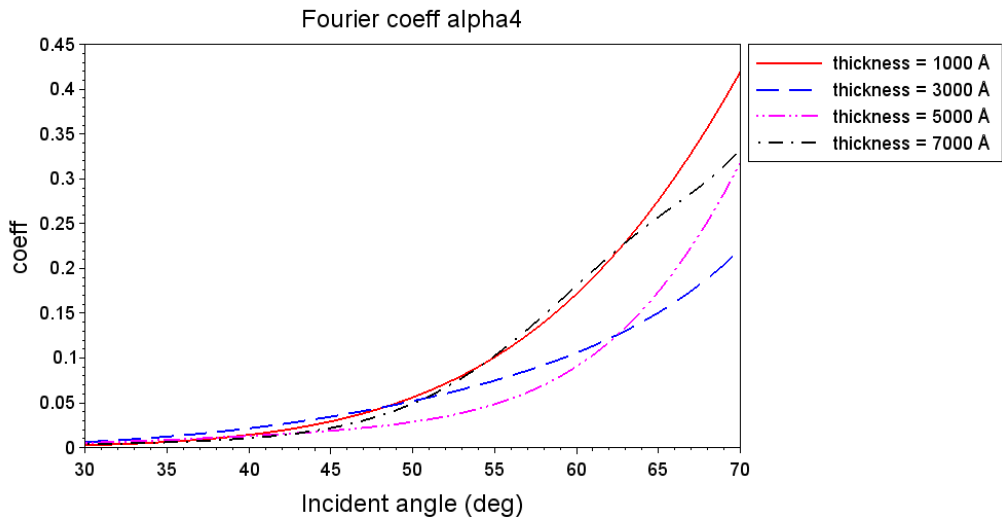
3.1. 단파장 마이크로 타원계의 한계

기존에는 단파장을 사용하는 마이크로 타원계에 대한 연구만 진행 되어 왔다. 수직 입사 방식을 사용하면서 타원 편광 해석을 할 수 있고 미세 패턴을 측정 할 수 있다는 의의는 있었지만 낮은 분해능으로 인해 실제로 실용적으로 쓰이지는 못했다. 단파장을 이용하는 마이크로 타원계에서는 광학 부품의 동적 구동없이 출사동 이미지의 원호를 따라 얻은 광 강도 신호의 푸리에 계수를 통해서 타원 파라미터를 산출 하고, 출사동의 반경에 따른 다중 입사각에 대한 타원 편광 분석을 한다. 단파장 마이크로 타원계의 측정 성능을 객관적으로 살펴보기 위해 광학계가 이상적으로 제작 되었다고 가정하고 기존 연구 방식으로 샘플의 특성에 따라 측정 되는 푸리에 계수 시뮬레이션을 실시 했다.

샘플은 Si 위에 SiO_2 가 쌓여 있다고 가정하고 두께는 1000\AA 에서 7000\AA 까지 2000\AA 간격으로 푸리에 계수 신호를 모델링 하여 겹쳐서 표현해 보았다. 그래프에 표시된 푸리에 계수 α_2 , α_4 는 (식 2.21b, 2.21c)에 따라 모델링 하였다.



<그림 3. 1 단파장 마이크로 타원계에서 SiO2 두께에 따른 α_2 신호>

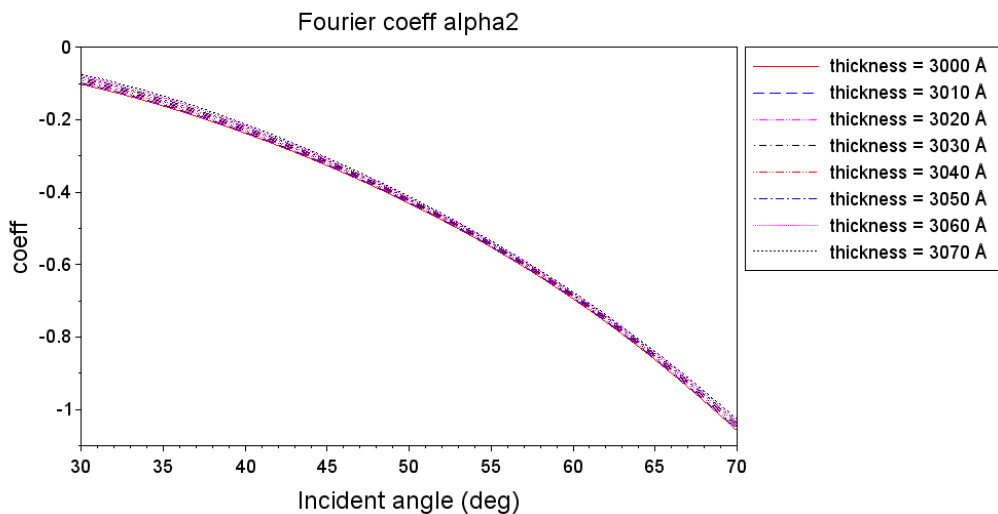


<그림 3. 2 단파장 마이크로 타원계에서 SiO2 두께에 따른 α_4 신호>

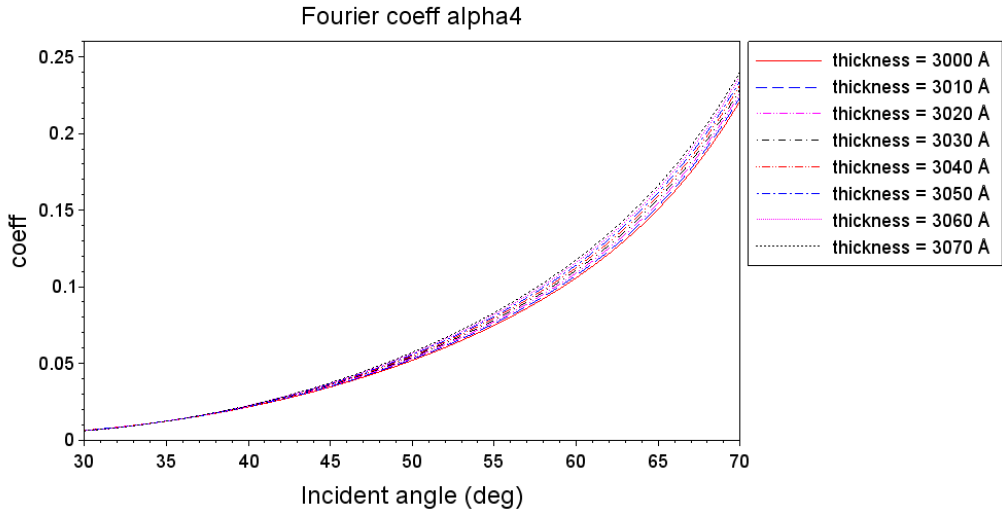
위 그래프를 보면 알 수 있듯이 두께의 변화에 따른 신호의 분별력이 크지 않다는 것을 알 수 있다. 특히 3000Å 과 5000Å 의 경우 α_2 , α_4 신호

모두 약간의 곡률 차이만 있을 뿐 개형은 거의 똑같다고 볼 수 있다. 그리고 피팅에서 중요한 판별 요소가 되는 신호의 피크(peak)와 밸리(valley)가 두께 7000Å 까지도 전혀 존재 하지 않는다. 결과 적으로 기존의 단파장 마이크로 타원계로는 신호에 약간의 노이즈나 왜곡 요소만 존재해도 두께를 분별하여 측정 하는게 어렵다.

그리고 두께의 미세 변화에 의한 영향을 알아보기 위한 시뮬레이션을 수행 했다. Si 기판 위에 SiO₂ 박막이 쌓여 있는 샘플에서 두께 3000Å 를 기준으로 10Å 씩 두께를 변화 시켰을 때의 푸리에 계수 신호의 변화를 관찰 해 보았다.



<그림 3.3 단파장 마이크로 타원계에서 SiO₂ 두께의 미세 변화에 따른 α_2 신호 변화>



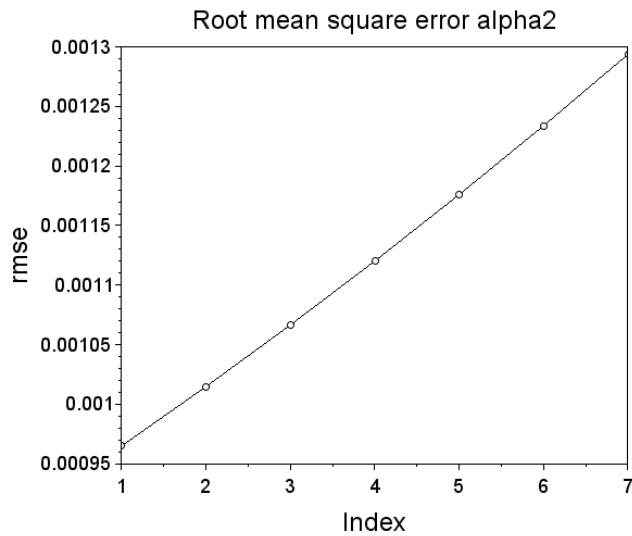
<그림 3. 4 단파장 마이크로 타원계에서 SiO₂ 두께의 미세 변화에 따른 α_4 신호 변화>

<그림 3. 3>, <그림 3. 4>는 총 8 가지 두께에 대해 모델링 한 결과인데 개형의 변화가 거의 일어나지 않으며 분별이 힘들다. 그래서 객관적인 비교를 위해 아래 식을 이용해 신호 사이의 Root Mean Square Error (RMSE)를 산출해 보았다.

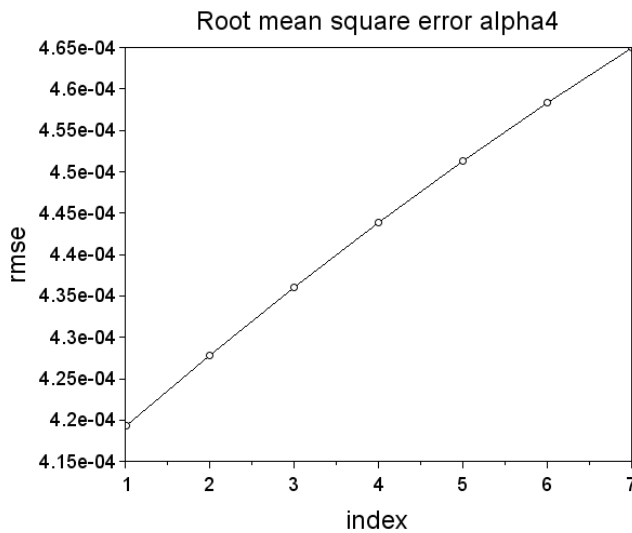
$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}}$$

(3.1)

10Å 두께 간격 그래프 사이의 RMSE 를 구한 결과는 다음과 같다. 총 8 개의 신호이기 때문에 7 개의 사이 간격 RMSE 가 나온다.



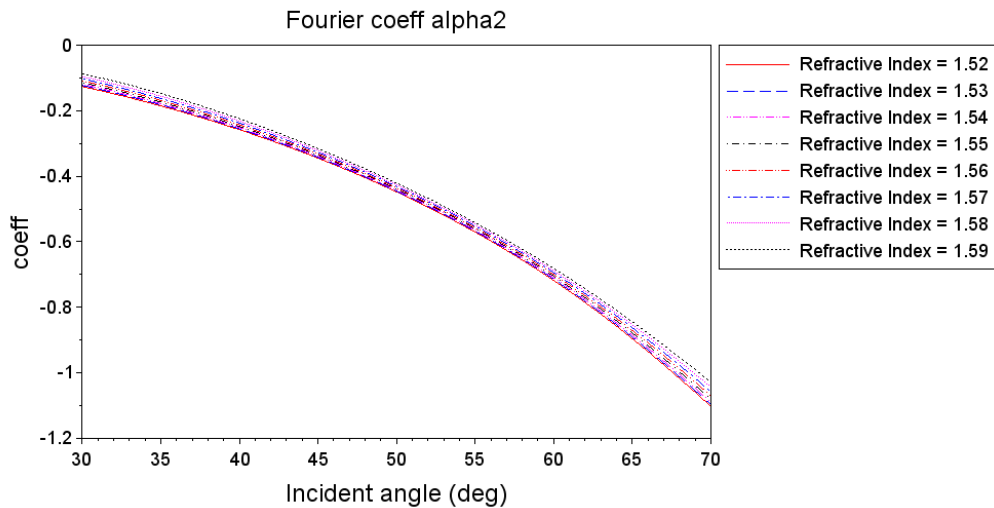
<그림 3.5 단파장 마이크로 타원계에서 두께를 10\AA 씩 변화 시켰을 때의 α_2 RMSE 그래프>



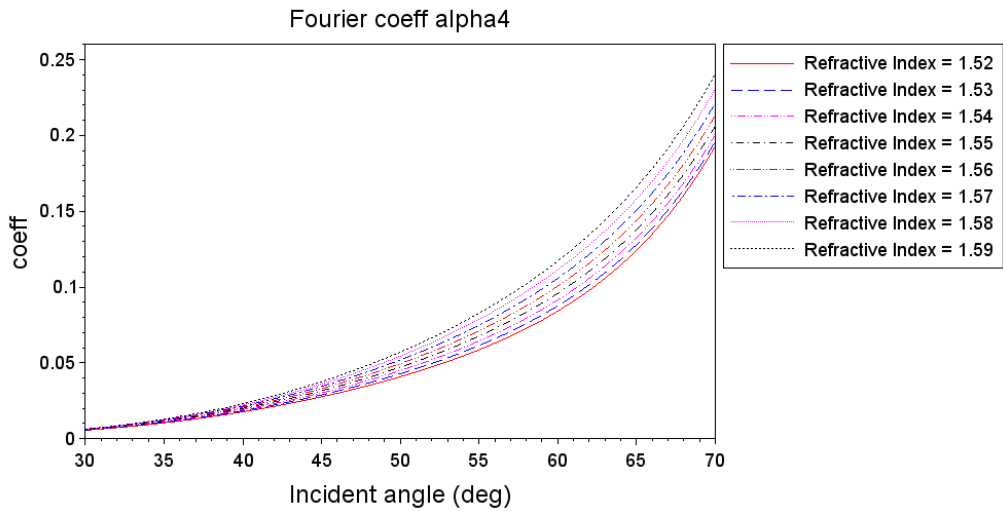
<그림 3.6 단파장 마이크로 타원계에서 두께를 10\AA 씩 변화 시켰을 때의 α_4 RMSE 그래프>

α_2 의 경우 RMSE 가 0.0011 정도 이고 α_4 의 경우 0.0004 정도 이다. 그래서 두께 10Å 변화에 따른 평균 RMSE 는 0.0008 이다. RMSE 로 따져봐도 신호의 변화가 매우 적은 것을 볼 수 있다.

다음은 굴절률의 미세 변화에 의한 영향을 알아보기 위해 두께를 3000Å 으로 고정 시킨 다음, 굴절률을 0.01 씩 변화시켜 가면서 측정되는 푸리에 계수 신호의 변화 역시 시뮬레이션 해 보았다.

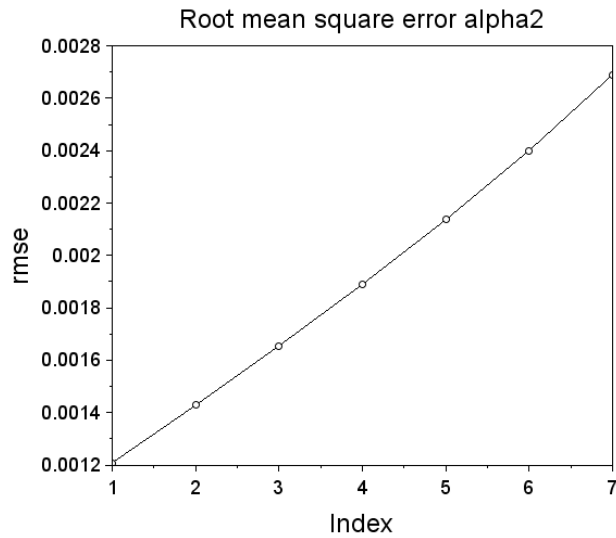


<그림 3.7 단과장 마이크로 타원계에서 SiO2 굴절률의 미세 변화에 따른 α_2 신호 변화>

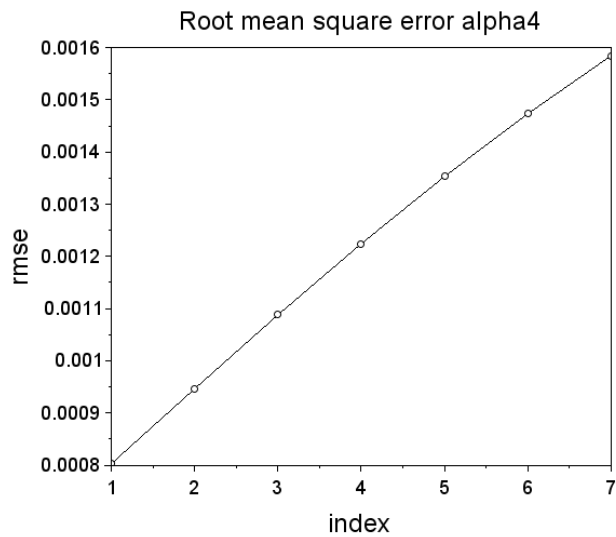


<그림 3. 8 단과장 마이크로 타원계에서 SiO2 굴절률의 미세 변화에 따른 α_4 신호 변화>

10Å 두께 변화 보다는 차이가 크지만 피크나 밸리가 존재 하지 않고 약간의 오프셋 혹은 곡률 변화만 일어 나기 때문에 역시나 신호의 분별이 어렵다. 이번에도 객관적인 비교를 위하여 0.01 굴절률 간격 그래프 사이의 RMSE 를 구한 결과는 다음과 같다.



<그림 3. 9 단파장 마이크로 타원계에서 굴절률을 0.01씩 변화 시켰을 때
의 α_2 RMSE 그래프>



<그림 3. 10 단파장 마이크로 타원계에서 굴절률을 0.01씩 변화 시켰을
때의 α_4 RMSE 그래프>

α_2 의 경우 RMSE 가 0.0020 정도 이고 α_4 의 경우 0.0012 정도 이다. 굴절률 0.01 변화에 따른 평균 RMSE 는 0.0016 이다. 두께와 마찬가지로 굴절률 역시 미세한 변화에 따른 신호의 변화가 적은 것을 볼 수 있다.

3.2. 다파장 마이크로 타원계를 통한 성능 개선

앞 절에서 단파장을 사용하는 마이크로 타원계의 경우 다중 입사각에 대한 분석을 하더라도 두께 및 굴절률의 미세 변화에 따른 푸리에 계수 신호 변화가 매우 적은 것을 볼 수 있었다. 그래서 측정의 분해능이 떨어 지는 문제가 있었고 이를 개선할 필요성이 있다. 일반 적인 타원계의 경우에도 처음에는 단파장을 사용했다가 다파장으로 광원이 확장 되면서 측정의 분해능이 많이 개선 되었고 산업에서 실용적으로 쓰일 정도가 되었다.

<표 3. 1 타원계의 발전 과정[43]>

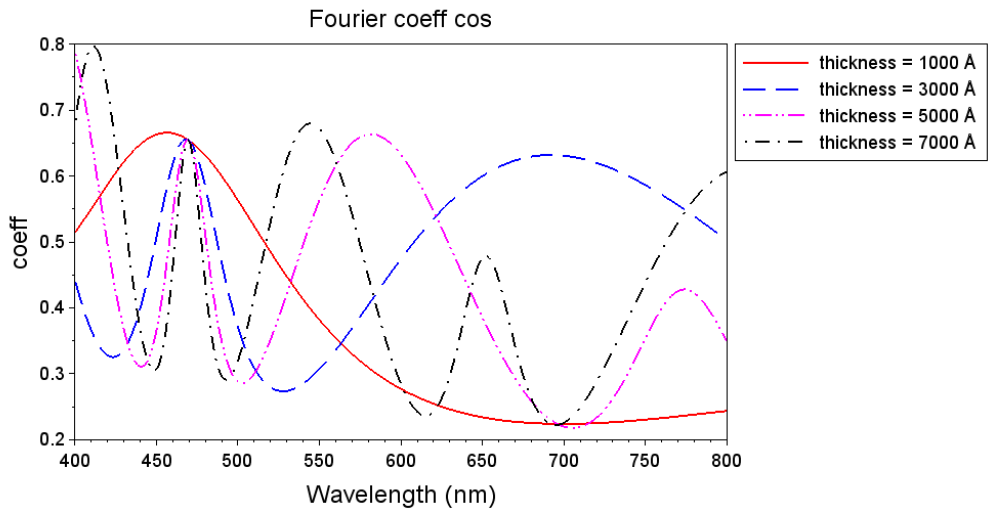
Year	Technique	Parameters determined	Number of independent data determined	Number of unknown parameters determined	Time taken (s)	Precision (°)	Author and reference
1887	E	Δ, Ψ	2	2	Theory and first experiment		Drude [1,2]
1945	E	Δ, Ψ	2	2	3600	Δ 0.02 Ψ 0.01	Rothen [8]
1971	E	Δ, Ψ, \mathbf{R}	3	2	3600	Δ 0.02 Ψ 0.01	Paik and Bockris [9]
1979	SE	$(\Delta, \Psi)\lambda = 1-100$	200	~ 10	3600	Δ 0.001 Ψ 0.001	Aspnes and Studna [18]
1984	RTSE	$\{(\Delta, \Psi)\lambda = 1-400^a\}t = 1-100$	80 000	$\sim 100^b$	3-600	Δ 0.02 Ψ 0.01	Muller and Farmer [42]
1990	RTSE (OMA)	$\{(\Delta, \Psi)\lambda = 1-1024^a\}t = 1-100$	200 000	$\sim 200^b$	0.8-600	Δ 0.02 Ψ 0.01	Kim, Collins, Vedam [14]
1994	RTSE (OMA)	$\{(\Delta, \Psi, \mathbf{R})\lambda = 1-1024^a\}t = 1-100$	300 000	$\sim 200^b$	0.8-600	Δ 0.007 Ψ 0.003	An, Collins et al. [43]

^aMaximum capability.

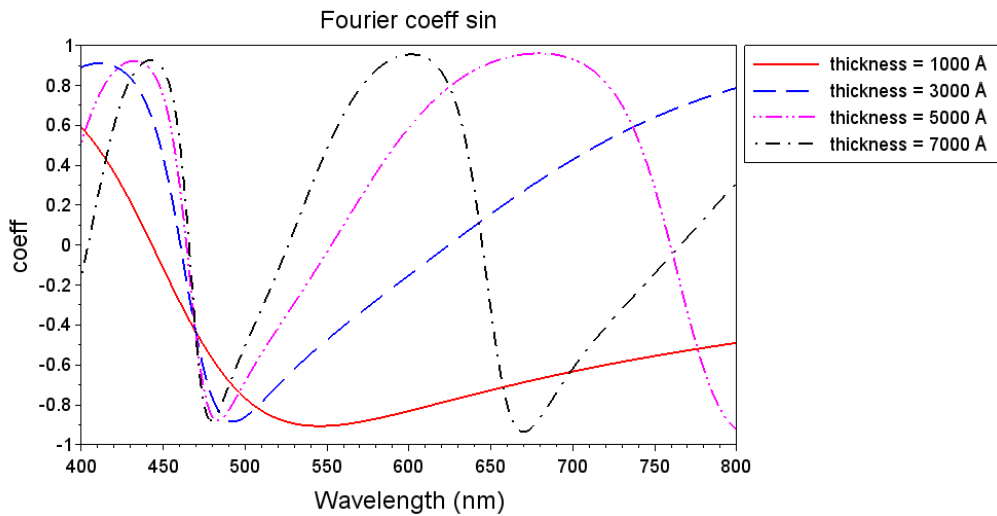
^b $d_b(t)$ and/or $d_s(t)$ vs. time.

<표 3. 1>을 보면 E 가 단파장을 사용하는 타원계이고 SE 가 Spectroscopic Ellipsometry 로써 다파장을 사용하는 분광 타원계이다. 그리고 RTSE 는 Real Time Spectroscopic Ellipsometry 로써 실시간으로 측정 가능한 분광 타원계를 의미한다. 최초에는 단파장 타원계가 개발 되었지만 측정 할 수 있는 데이터의 개수가 적었고 결정 할 수 있는 박막의 특성 수도 적었다. 하지만 이를 다파장으로 확장시킨 결과, 사용 하는 파장의 개수에 따라 측정 할 수 있는 데이터의 개수도 늘어 났고 결정 할 수 있는 박막의 특성 수도 늘어 났다. 그리고 측정의 정밀도도 향상 되었다. 그래서 기존에 단파장만 사용 하는 마이크로 타원계의 한계를 극복하기 위해서는 다파장을 이용하는 마이크로 분광 타원계를 만들면 된다는 것을 유추 할 수 있다.

앞에서 수행한 단파장 마이크로 타원계에서 측정 되는 푸리에 계수 그래프 시뮬레이션을 이번 연구에서 구성할 다파장 마이크로 타원계에 대해서도 수행했다. 앞 에서와 마찬가지로 Si 기판 위에 SiO_2 박막이 쌓여 있는 샘플에서 두께를 2000Å 간격으로 1000Å 에서 7000Å 까지의 푸리에 계수 신호를 모델링 하여 겹쳐서 표현해 보았다. 단파장 마이크로 타원계에서는 광 강도 모델링 식에 주기가 다른 코사인 항만 2 개 존재하여(식 2.21) 푸리에 계수를 α_2 , α_4 로 표현했지만 이번에 구성할 다파장을 사용하는 마이크로 타원계에서는 광 강도 모델링 식에 코사인 항과 사인 항이 존재 하므로(식 5.12, 5.14) 푸리에 계수를 코사인 푸리에 계수와 사인 푸리에 계수로 표현 하였다.



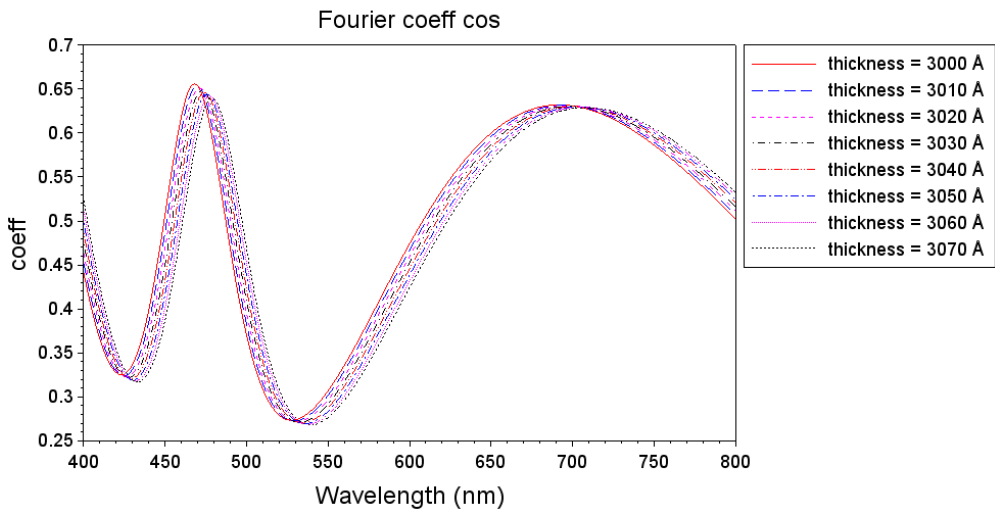
<그림 3. 11 다파장 마이크로 타원계에서 SiO₂ 두께에 따른 코사인 푸리에 계수 신호>



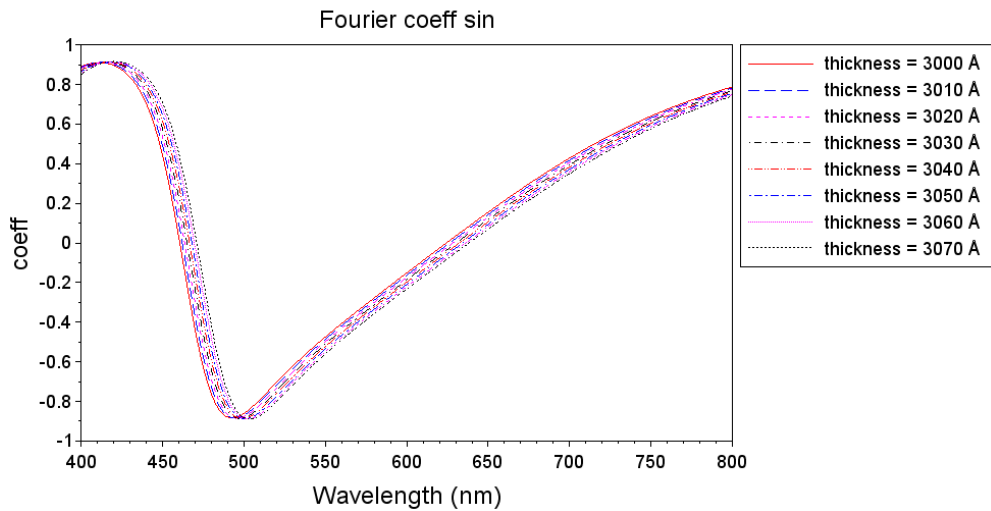
<그림 3. 12 다파장 마이크로 타원계에서 SiO₂ 두께에 따른 사인 푸리에 계수 신호>

이전 단파장 광원을 사용 할 때보다 신호의 분별력이 커진 것을 볼 수 있다. 무엇보다 단파장 마이크로 타원계에서는 7000\AA 이하의 두께에서 신호 상에 피크나 밸리가 하나도 없었지만 다파장 광원을 사용할 경우 1000\AA 에서도 존재하며, 두께의 변화에 따라 피크와 밸리의 위치가 달라지고 개수 변화가 뚜렷하게 일어나게 되어, 비선형 피팅의 정확도를 높여 줄 수 있고 결과적으로 측정의 분해능이 향상된다.

그 다음 박막 특성의 미세 변화에 의한 영향을 알아보기 위해 두께 3000\AA 를 기준으로 10\AA 씩 두께를 변화 시켜 가면서 다파장을 사용 했을 때 측정 될 수 있는 푸리에 계수 신호의 변화를 시뮬레이션 해 보았다.

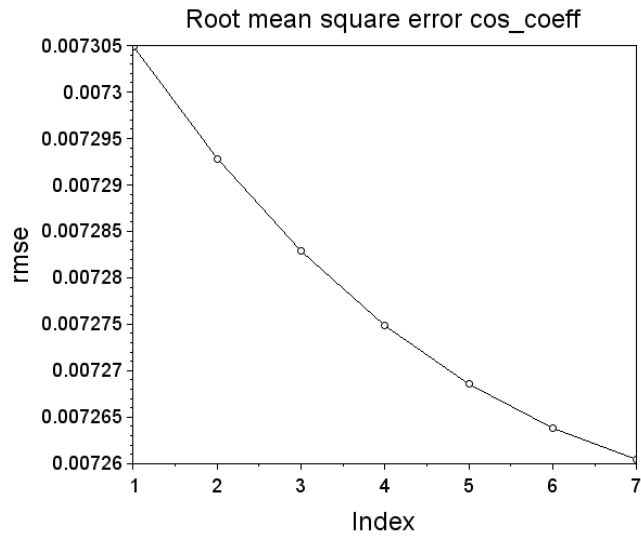


<그림 3. 13 다파장 마이크로 타원계에서 SiO_2 두께의 미세 변화에 따른 코사인 푸리에 계수 신호 변화>

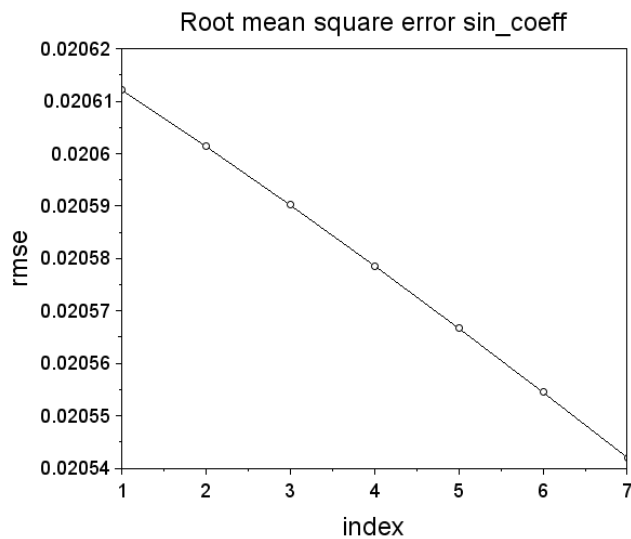


<그림 3. 14 다파장 마이크로 타원계에서 SiO₂ 두께의 미세 변화에 따른 사인 푸리에 계수 신호 변화>

일단 신호에 피크와 밸리가 존재 하며, 두께가 변화함에 따라 피크와 밸리의 이동이 생긴다. 신호 사이의 간격을 보더라도 이전 단파장 광원을 이용 했을 때의 변화(<그림 3. 3>, <그림 3. 4>) 보다는 변화량이 큰 것을 볼 수 있다. 객관적으로 신호의 변화를 살펴보기 위해, 인접한 두께 사이의 RMSE 값을 구한 결과는 다음과 같다.



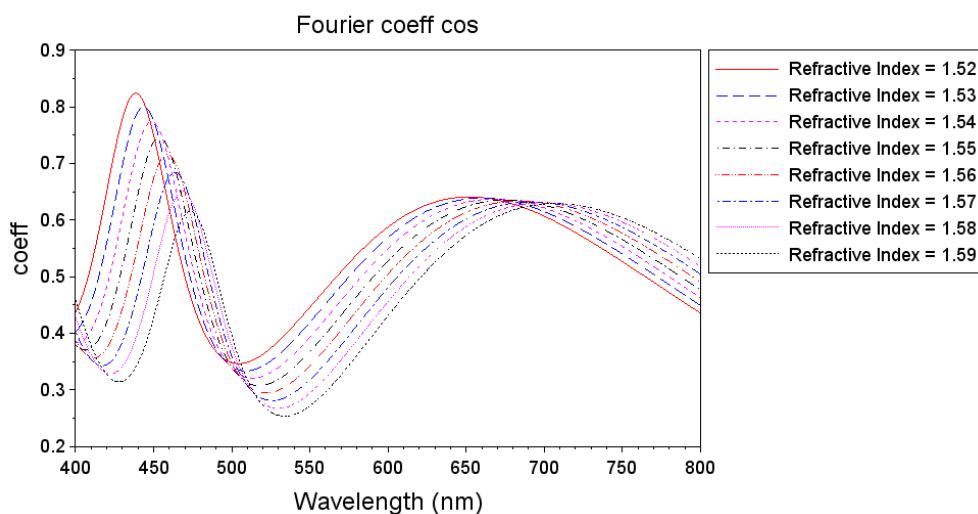
<그림 3. 15 다파장 마이크로 타원계에서 두께를 10\AA 씩 변화 시켰을 때
의 코사인 푸리에 계수 RMSE 그래프>



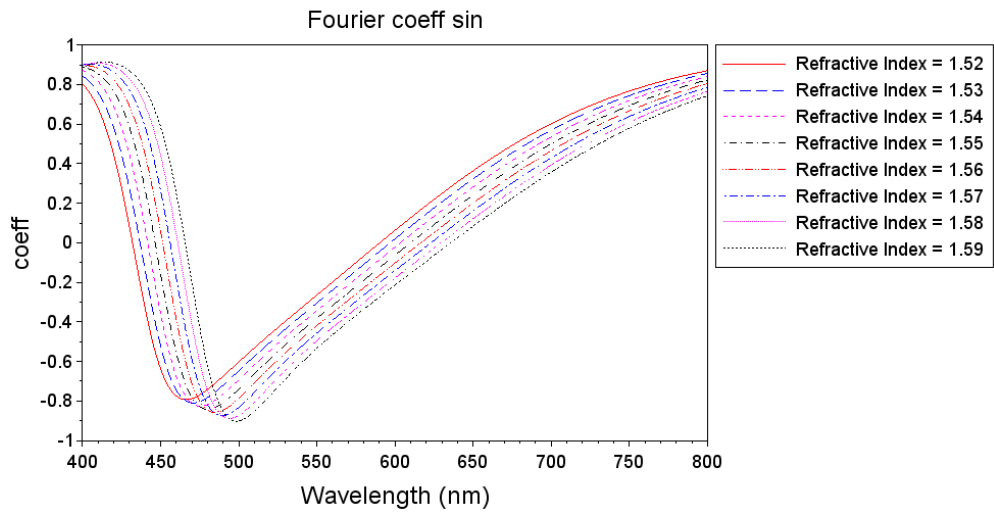
<그림 3. 16 다파장 마이크로 타원계에서 두께를 10\AA 씩 변화 시켰을 때
의 사인 푸리에 계수 RMSE 그래프>

앞에서 단파장을 사용 할 때 10\AA 두께 변화에 따른 RMSE 는 평균 0.0008 정도 였지만 다파장을 사용 할 경우에는 평균 0.0140 정도로 분별력이 훨씬 향상 되었다.

다음은 두께를 3000\AA 으로 고정 시킨 다음 굴절률을 0.01 씩 변화 시키면서 다파장을 사용 했을 때 푸리에 계수 신호의 변화를 시뮬레이션 해 보았다.

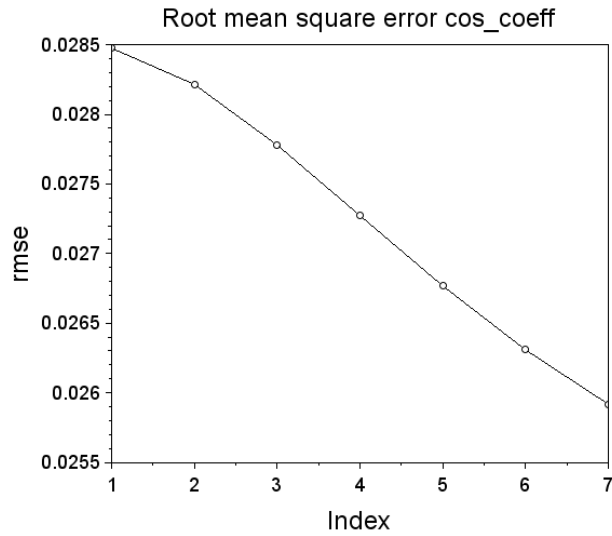


<그림 3. 17 다파장 마이크로 타원계에서 SiO_2 굴절률의 미세 변화에 따른 코사인 푸리에 계수 신호 변화>

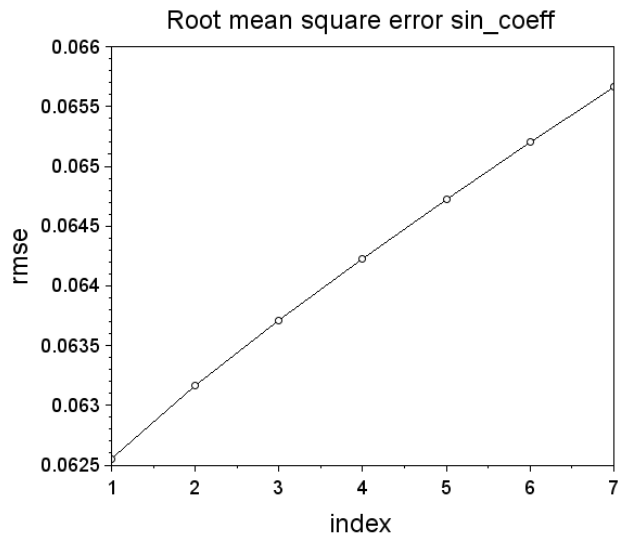


<그림 3. 18 다파장 마이크로 타원계에서 SiO2 굴절률의 미세 변화에 따른 사인 푸리에 계수 신호 변화>

역시나 단파장 광원을 이용 했을 때의 신호 변화(<그림 3. 7>, <그림 3. 8>) 보다는 변화량이 큰 것을 볼 수 있다. 인접한 굴절률 사이의 RMSE 값을 구한 결과는 다음과 같다.



<그림 3. 19 다파장 마이크로 타원계에서 굴절률을 0.01씩 변화 시켰을 때의 코사인 푸리에 계수 RMSE 그래프>



<그림 3. 20 다파장 마이크로 타원계에서 굴절률을 0.01씩 변화 시켰을 때의 사인 푸리에 계수 RMSE 그래프>

앞에서 단파장을 사용 할 때 0.01 굴절률 변화에 따른 RMSE 는 평균 0.0016 정도 였지만 다파장을 사용 할 경우에는 평균 0.0455 정도로 분별력이 훨씬 향상 되었다. 이제까지의 시뮬레이션을 정리한 결과는 다음과 같다.

<표 3. 2 SiO₂ 샘플의 10Å 두께 변화에 따른 측정 신호 RMSE>

	Single Wavelength and Multi Incident Angle	Multi Wavelength
RMSE	0.0008	0.0140

<표 3. 3 SiO₂ 샘플의 0.01 굴절률 변화에 따른 측정 신호 RMSE>

	Single Wavelength and Multi Incident Angle	Multi Wavelength
RMSE	0.0016	0.0455

결국 마이크로 타원계에서도 다파장 광원을 사용 하면 단파장 및 다중 입사각 분석을 할 때 보다 두께 및 굴절률 변화에 따른 측정 신호의 분별력이 모두 향상되며 측정 성능이 향상 될 수 있음을 확인할 수 있다.

제 4 장 마이크로 분광 타원계의 구성

4.1. 다파장을 이용하는 마이크로 타원계의 구현 방식

마이크로 타원계를 다파장으로 확장 시키기 위해서는 광원으로 백색광을 사용 하고 센서 부분에 스펙트로미터를 설치하여 빛을 분광 시켜 해석을 하거나, 광원 부분에 모노크로메이터를 설치해 단파장들을 연속적으로 스위프(Sweeping)해 가면서 그에 따라 센서에서 얻는 신호 변화를 기록 할 수 있어야 한다.

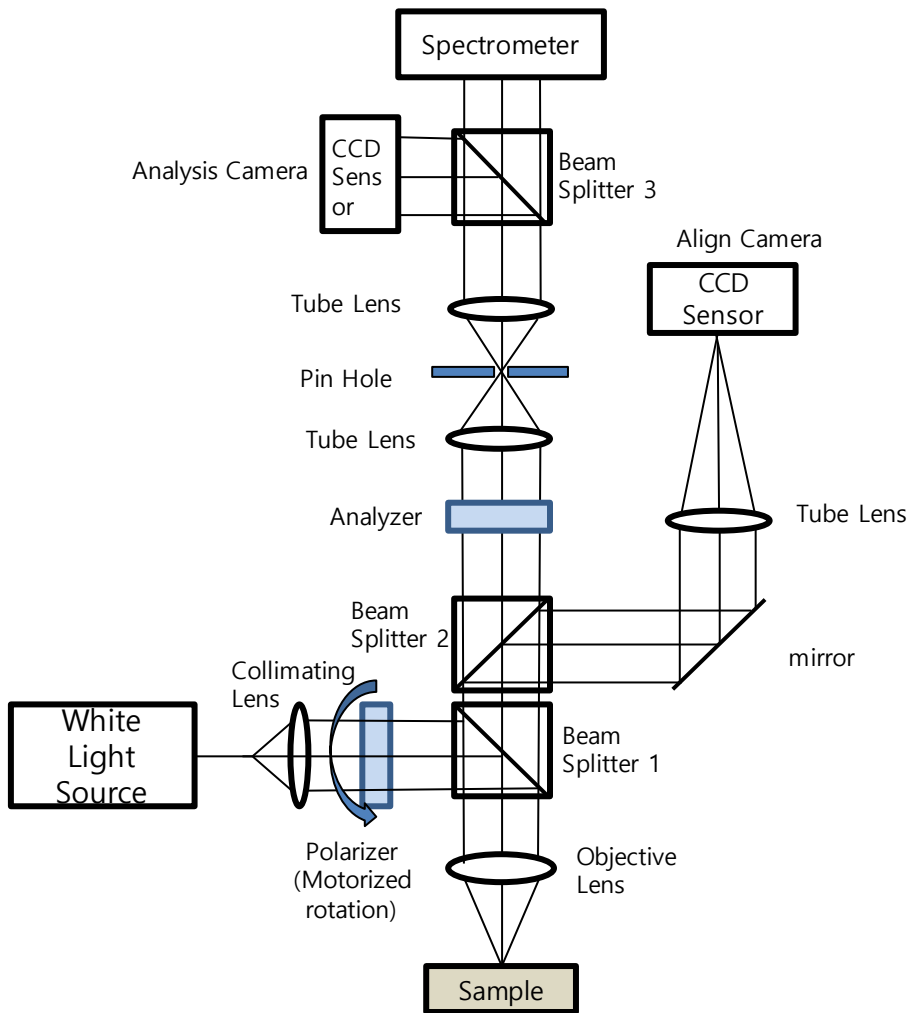
보통 수직 입사 광학계의 경우 측면으로 들어가는 조명을 사용하며, 빛을 샘플에 수직으로 입사 시키기 위해 빔 스플리터 같은 부품이 들어 간다. 빔 스플리터는 빛을 정해진 비율만큼 투과와 반사로 나누어 진행시키기 때문에 부품을 거쳐 갈 때 마다 광량의 손실이 일어 난다. 앞의 다파장 확장 방법 중 후자의 경우 모노크로메이터를 통해 나오는 단파장의 광량이 약하기 때문에, 수직 입사 광학계를 사용하는 마이크로 타원계의 특성 상 센서에서 광량의 검출이 어려워 진다는 문제가 발생한다. 또한 모노크로메이터의 경우 파장을 스위프하기 위한 동적 구동이 존재 하기 때문에 제어가 복잡해 지고 또, 다파장을 스위프하는 데는 시간이 걸리기 때문에 측정 속도가 느려 지는 문제가 있다.

위와 같은 이유로 후자보다 전자가 광량의 확보가 용이하며 속도 적인 측면이나 제어의 편의성 측면에서도 유리 하다. 그래서 본 연구 에서는 백색광을 샘플에 입사 시키고 빛의 수광 부에 스펙트로미터를 설치 해서, 분광을 통해 다파장에 대한 신호를 얻을 수 있는 마이크로 분광 타원계를 구성했다.

4.2. 마이크로 분광 타원계의 광학계 구성

4.2.1. 개요도

이번 연구를 위해 구성된 광학계의 개요도는 다음과 같다.



<그림 4. 1 마이크로 분광 타원계의 개요도>

광원으로는 백색광을 사용 했으며 광원으로부터 나온 빛은 시준렌즈(Collimating lens)를 통해 평행광으로 광학계에 들어 간다. 그 후에 일정한 각속도로 회전하는 Polarizer 를 통과해 편광 된 빛으로 전환 된 후에 첫번째 빔 스플리터(Beam Splitter 1)에 반사되어 대물 렌즈를 통과하고 샘플에 입사 된다. 샘플을 맞고 반사 되어 나온 빛은 다시 첫번째 빔 스플리터(Beam Splitter 1)를 투과하고 투과된 빛은 두번째 빔 스플리터(Beam Splitter 2)를 통해 양 갈래 빛으로 분기된다.

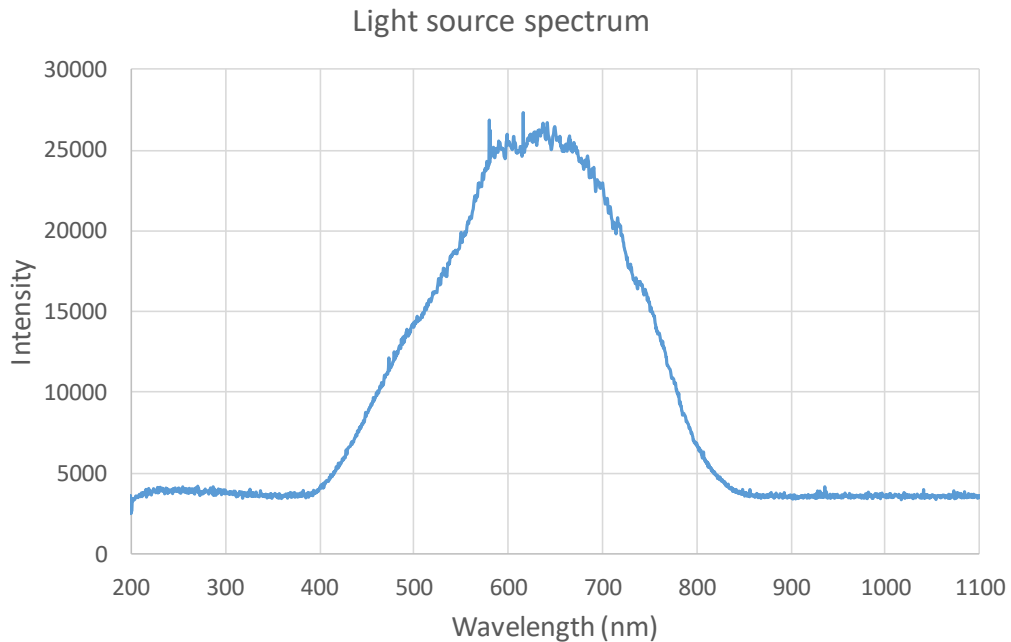
우선 반사 되어 측면으로 향하는 빛은 튜브 렌즈를 통과해 2D 카메라(Align Camera)에 이미지를 형성한다. 해당 카메라에서는 현재 측정 하는 샘플의 이미지가 표시된다. 이 부분은 측정 시 현재 위치를 판단하고 정확한 위치를 맞추는데 사용되는 얼라인 광학계의 역할을 한다. 미세 패턴을 측정 하기 위해서는 측정 영역을 패턴 안에 정확히 넣는 것이 중요한데, 이 얼라인 광학계를 통해 샘플 상의 측정 스팟을 정확히 정렬 할 수 있게 된다.

위 쪽으로 투과된 빛은 Polarizer 와 같은 편광 판으로 이루어진 Analyzer 를 통과해 다시 전기장이 한 축 방향으로 진동하는 빛만 걸러낸다. 그 다음 튜브렌즈를 통과 하여 위쪽에 이미지 면(Field Stop)이 형성되는데 여기다가 핀 홀을 설치 하여 일부 영역의 빛만 다시 걸러 낸다. 이 핀홀은 측정 지점의 크기를 줄이는 역할 이외에도 핀홀 위쪽으로 나오는 빛 만을 기준으로 봤을 때 편광판에 진입하는 빛의 화각을 줄여 줘서 편광판의 Acceptance Angle 을 충족 시킬 수 있게 하는 역할을 한다. 이는 다음 절에 자세히 설명할 것이다. 핀 홀을 통과한 빛은 튜브 렌즈를 하나 더 통과해 결국 대물 렌즈 출사동 면의 빛을 세번째 빔 스플리터(Beam Splitter 3)를 통해 2D 카메라(Analysis Camera)와 스펙트로미터로 분기 시켜서 각각 받을 수 있게 한다. 이 부분은 박막 측정에 실제로 사용되는 부분이라서 분석 광학계라고 명명한다.

분석 광학계의 2D 카메라(Analysis Camera)는 대물 렌즈의 출사동면 전체 이미지를 표시 하게 되고 스펙트로미터는 출사동면 중에 다시 특정 포인트의 빛만 수광 하게 된다. 2D 카메라(Analysis Camera)의 이미지는 박막 분석에 직접 사용되지는 않지만 스펙트로미터가 출사동면 내에서 수광하고 있는 좌표를 감지 하고 원하는 위치에 정확히 정렬하는데 사용된다. 결과 적으로 스펙트로미터를 통해 감지 되는 빛이 박막 측정에 사용 되며, 분석 광학계를 통해 출사동에서 원하는 입사각의 반지름과 방위각의 빛을 수광 한 다음에 연속적으로 회전 하는 Polarizer 에 의해 바뀌는 분광 스펙트럼의 변화를 캡처해서 파장 별 광 강도 주기 신호를 얻는다. 광학계를 이루는 각 구성요소에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

4.2.2. 광원

일단 광원으로 다양한 파장이 나오는 백색광을 사용해야 하는 데, 가시광선 전 영역을 안정적으로 출력할 수 있는 텅스텐-할로젠 램프를 사용 했다. 램프에서 나오는 빛의 파장 범위는 400-800nm 이며 150W 의 고출력 램프를 사용 함으로써 광량을 최대한 높였다. 샘플에 광량이 많은 백색광을 입사 시키고 나중에 분광을 시키더라도, 앞에서 구성한 광학계에 포함된 많은 광학 부품으로 인한 광량 손실이 예상되기 때문에 가능한 한 높은 출력의 광원을 사용하는 것이 중요하다. 램프로부터 나온 빛은 시준 렌즈를 통해 평행 광으로 바뀌고 광학계로 들어가게 된다. 이 연구에서 사용된 광원의 스펙트럼은 <그림 4. 2>와 같다.

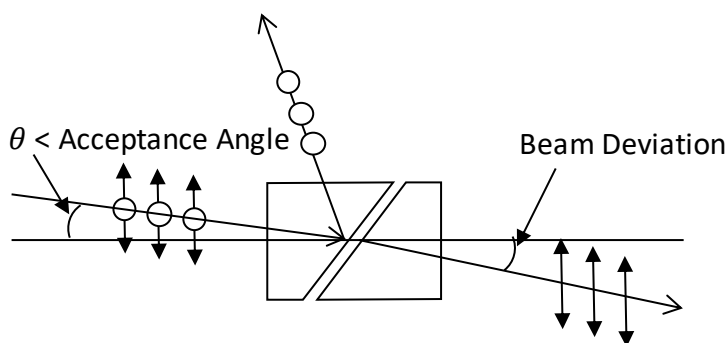


<그림 4. 2 실험에 사용된 할로겐 광원 스펙트럼>

4.2.3. 편광판

시준 렌즈를 지난 평행광의 빛은 편광판으로 구성된 Polarizer 를 통과하면서 선형 편광 된다. 그리고 샘플에 반사되어 나온 빛을 통과시키는 Analyzer 역시 Polarizer 와 같은 종류의 편광판으로 구성되어 있다. 편광판의 경우 빛이 투과되는 축과 그것에 수직이면서 빛이 소멸되는 축이 있는데 두 축의 투과 광량비를 뜻하는 소광비(Extinction ratio)가 중요하다. 수치가 높을수록 투과 축을 제외한 방향의 빛을 차단 시키는 효과가 큰 것을 의미하며 빛을 좀 더 완전 편광 시킬 수 있다.

이 연구에 사용되는 광학계에는 Thorlabs 사의 Glan-Taylor Calcite 편광판을 사용하였다. 이 제품의 소광비는 100000:1 로 우수한 편광 성능을 가지고 있다. 그리고 정해진 스펙 대로 완전 편광을 시키기 위해서는 빛을 일정 각도 이하로만 투과 시켜야 하는데 이를 Acceptance angle 이라고 한다. 마지막으로 입사하는 빛과 투과된 빛은 일직선을 이루기 보다는 일정 각도 꺾여서 진행 하게 되는데 이 각도를 Beam deviation 이라고 한다. 이 모든 값들을 구성된 광학계에 문제가 되지 않는 선에서 맞추어야 하는데 해당 제품의 경우 1.6° 의 Acceptance angle 을 가지며 Beam deviation 또한 3 arcmin 으로 작은 값을 가지고 있어서 앞에서 구성된 광학계에 사용이 가능했다. 편광판은 회전 스테이지에 결합되어 자동 회전이 가능하며 이를 통해 정확한 위치각 정렬 및 일정 각도 회전에 따른 광 강도 신호 획득을 가능하게 만들었다.



<그림 4. 3 편광판에서의 빛의 편광>



<그림 4. 4 Thorlabs Glan Tayler Polarizer>³

4.2.4. 빔 스플리터

빔 스플리터는 광원과 Polarizer 를 거쳐 편광 되어 들어 온 빛을 반사 시켜서 샘플에 입사 시키고, 샘플에 맞고 나온 빛을 다시 투과 시켜서 수광 부로 보내는 역할을 한다. 편광 상태와 관계 없이 항상 일정한 반사율과 투과율을 유지 시키는 것이 중요하기 때문에 여기서는 비 편광 빔 스플리터(non-polarizing beam splitter)를 사용 하였다. 그리고 광학계 정렬을 좀 더 간편 하게 하기 위해 조립의 자유도가 높은 Plate 형이 아닌 Cube 형 빔 스플리터를 사용했다. 사용하려는 광원의 파장 범위가 400~800nm 이기 때문에 이 영역을 커버하기 위해 Thorlabs 사의 BS010 제품을 사용 했다. 이 제품은 해당 영역에서의 빛의 투과 및 반사 비율이 대략 50:50 로 설계 되어 있는 제품이다.

³ <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=GT10-A>

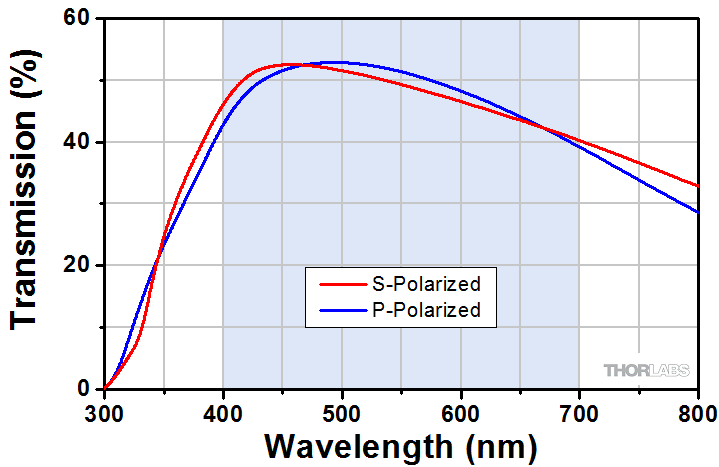


<그림 4. 5 Thorlabs BS010 빔 스플리터>⁴

보통 단파장에 대해서는 p 파와 s 파의 투과 및 반사 비율이 50:50 로 일정한 제품이 존재 하지만 다파장에 대해서 50:50 를 정확히 모두 만족시키는 제품은 존재 하지 않는다. 이는 편광판과 샘플 면 이외에, 빔 스플리터 에서도 편광 상태의 추가 적인 변화를 발생 시켜서 측정 오차의 원인이 되며 다파장을 이용하는 마이크로 분광 타원계 개발에 있어서 큰 방해요소가 된다. <그림 4. 6>는 선정된 빔 스플리터 제품의 실제 파장 별 투과율 데이터 그래프이다. 파장에 따라 값이 달라지며 또한 p 파와 s 파가 서로 다른 것을 볼 수 있다.

⁴ <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=BS010>

Typical 50:50 Cube Beamsplitter Transmission



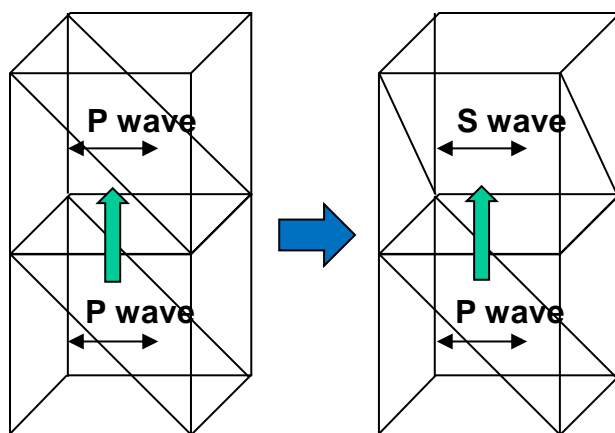
<그림 4. 6 파장 변화에 따른 빔 스플리터의 투과율 변화>⁵

광학계에 사용된 빔 스플리터는 총 3 개이다. 광원으로부터 나와서 스펙트로미터로 향하는 빛 만을 기준으로 봤을 때, 대물 렌즈 위 첫번째 빔 스플리터(Beam Splitter 1)에서는 반사와 투과가 각각 한번씩 일어나며 두번째(Beam Splitter 2) 및 세번째 빔 스플리터(Beam Splitter 3)에서는 투과만 한번씩 일어난다. 빛이 빔 스플리터를 지나는 모든 경우에 대해서 <그림 4. 6>의 데이터에 의한 편광 상태의 변화가 발생 된다. 그래서 추 후에 측정 신호의 해석을 위해 출사동의 전기장을 구하는 과정에서, 편광 상태 변화가 발생하는 모든 경우에 대해서 Jones Matrix 을 대입해서 보상을 해줘야 하지만 빔 스플리터에 의한 변화까지 고려한다면 수식이 복잡해지기 때문에 최대한 간편하게 만들 수 있는 방법을 고안했다.

<그림 4. 1>에 보이 듯이 샘플에서 반사되어 나온 빛은 첫번째 빔 스플리터(Beam Splitter 1)에 투과 된 후 바로 두번째 빔 스플리터(Beam

⁵ https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=754

Splitter 2)에 투과 된다. 두 빔 스플리터의 입사면을 같은 방향으로 정렬했을 경우 각 투과 과정에서 모두 편광 상태의 변화가 일어난다. 하지만 둘 중에 하나의 빔 스플리터가 90° 옆방향으로 회전 해 있다고 가정 하면 입사면이 서로 수직이 되기 때문에 아래 쪽에서는 입사면에 평행 방향으로 통과 했던 빛이 위에서는 수직 방향으로 통과 하게 된다<그림 4. 7>. 결국 빔 스플리터의 입사면을 기준으로 아래 쪽에서는 p 파로 투과 된 빛이 위에서는 s 파로 투과되고 반대로 아래에서 s 파로 투과 된 빛은 위에서 p 파로 투과되게 되어서 파장에 관계없이 편광 상태 변화가 상쇄 될 수 있다. 결과적으로 같은 제품의 빔 스플리터를 서로 90° 돌려서 배치 한다고 하면 첫번째, 두번째 빔 스플리터(Beam Splitter 1, 2)에서의 투과에 의한 편광 상태 변화는 고려하지 않아도 된다. <그림 4. 1>의 개요도에서는 얼라인 광학계를 측면에 표시 했지만 실제로는 두번째 빔 스플리터를 90° 회전 시켜서 얼라인 광학계가 앞쪽으로 튀어 나오게 제작을 했다.



<그림 4. 7 빔 스플리터 회전에 의한 편광 효과 상쇄>

4.2.5. 대물 렌즈

마이크로 타원계에서는 렌즈의 개구수에 의해 빛의 최대 입사각이 결정되므로 가능한 한 개구수가 큰 렌즈를 사용해야 한다. 개구수가 클수록 빛의 최대 입사각이 커져서 많은 물질의 Brewster Angle 을 포함 할 수 있으며, 측정 할 수 있는 샘플의 범위도 늘어 나게 된다. 개구수가 커지면 렌즈의 배율 또한 커지는게 일반적인데 이는 미세 패턴 측정에는 유리 한 면이 되지만 동시에 초점 거리가 줄어 들어서 사용이 까다로워지고 대물 렌즈의 Clear Aperture 의 크기 감소로 인한 출사동 면의 광량 부족 문제도 발생한다.

구성된 광학계에서는 대물 렌즈로 Nikon 사의 CFI TU Plan Apo EPI 100x 제품을 사용 했다. 개구수가 0.9 로 최대 입사각이 64.1° 까지 확보 될 수 있고 이에 반해 작동 거리는 2mm 로 개구수에 비해 큰 편이라 포커스를 맞추기가 수월하다. 무엇보다 Apochromatic 렌즈 이기 때문에 색 수차 보정이 잘 되어 있어, 파장에 따른 포커스 거리가 거의 변하지 않으므로 다파장 분석에 유리한 점이 있다. 하지만 고배율 렌즈의 특성상 Clear Aperture 가 3.5mm 정도로 작아서 광량이 줄어드는 문제는 여전히 존재한다. 그래서 앞 절의 광원 선정 부분에서 설명했던 데로 150W 의 고출력 텅스텐-할로겐 램프를 사용해서 광량이 부족한 문제를 해결했다.

4.2.6. 스펙트로미터

구성된 광학계에서는 Polarizer 의 회전에 따라 스펙트로미터에서 감지되는 빛의 분광 데이터를 획득하고 분석하여 박막을 측정 한다. 결국 스펙트로미터가 주 측정 센서이기 때문에 중요한 부품이 된다. 측정의 정밀도를 높이기 위해선 감도가 높고 파장 분해능이 높은 제품을 사용하는 것이 좋다. 본 광학계에서 선정된 제품은 Ocean optics 사의 Maya 2000 Pro 이다. 165~1100nm 범위의 빛을 감지 할 수 있으며 그 범위를 2068 개의 센서로 받기 때문에 평균 0.45nm 의 파장 분해능을 가진다. 자세한 스펙을 <표 4.1>에 표시하였다.



<그림 4. 8 Maya 2000 Pro 스펙트로미터>

<표 4. 1 Maya 2000 Pro Specification>

Detectors	
Type:	Back-thinned, 2D
Options:	Hamamatsu S10420 (best option for UV-Vis applications)
Quantum efficiency:	75% peak @ 600 nm
Spectroscopic	
Spectral range (detector response):	~165-1100 nm
Optical resolution (FWHM):	Depends on grating groove density and slit size (multiple options available)
Signal-to-noise ratio at full signal:	~450:1
Dynamic range:	15000:1 (typical)
Integration time:	7.2 ms-5 seconds
Fiber optic connector:	SMA 905 to 0.22 numerical aperture single-strand optical fiber

4.2.7. 카메라

얼라인 광학계 부분의 카메라(Align Camera)는 측정 샘플의 이미지를 보고 측정 스팟을 패턴 안에 정확히 정렬 하기 위해 사용한다. 해상도가 많이 뛰어 날 필요는 없지만 샘플의 패턴을 인식 하고 정확하게 매칭 할 정도는 되어 한다. 640*480 해상도를 가지며 이더넷 통신을 통해 쉽게 컨트롤 PC 와 연결 할 수 있으면서도 264 fps(Frame per second)의 빠른 영상 획득 속도를 가지는 Vieworks VH-310G2 제품을 사용 했다.

분석 광학계 부분 카메라(Analysis Camera)의 경우 측정에 직접적으로 쓰이지는 않지만 출사동 상에서 스펙트로미터로 수광 되는 포인트의 좌표를 판별하기 위해 사용 한다. 일단 앞절에서 선정된 대물 렌즈의 Clear Aperture 크기에 따라 출사동의 지름은 3.5mm 가 되는데 이 크기를 충분히 포함 할 수 있을 정도의 센서 크기를 가지는 카메라를 선정 하기만 하면

된다. 그래서 해당 카메라로 Basler 사의 acA2000-340km 을 사용 했는데 CMOS 센서를 사용하는 카메라이며 센서 크기는 11.3 * 6mm 로 출사동을 충분히 포함 할 수 있는 크기이다.

4.2.8. 핀홀

분석 광학계의 두 튜브렌즈 사이에 들어가는 핀홀은 FOV(Field of View)가 결정되는 필드 스톱(Field Stop)에서 빛의 일부 영역만 통과 시켜 측정 스팟의 영역을 줄이는 역할을 한다. 하지만 이것 외에도 중요한 역할이 있는데 핀홀을 통과하는 빛 만을 기준으로 봤을 때 편광판으로 진입하는 화각을 줄여서 편광판의 Acceptance angle 을 충족시켜 주는 역할을 한다. 핀홀의 크기와 빛의 진입 화각 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{d}{2} = f * \tan \frac{\theta}{2}$$

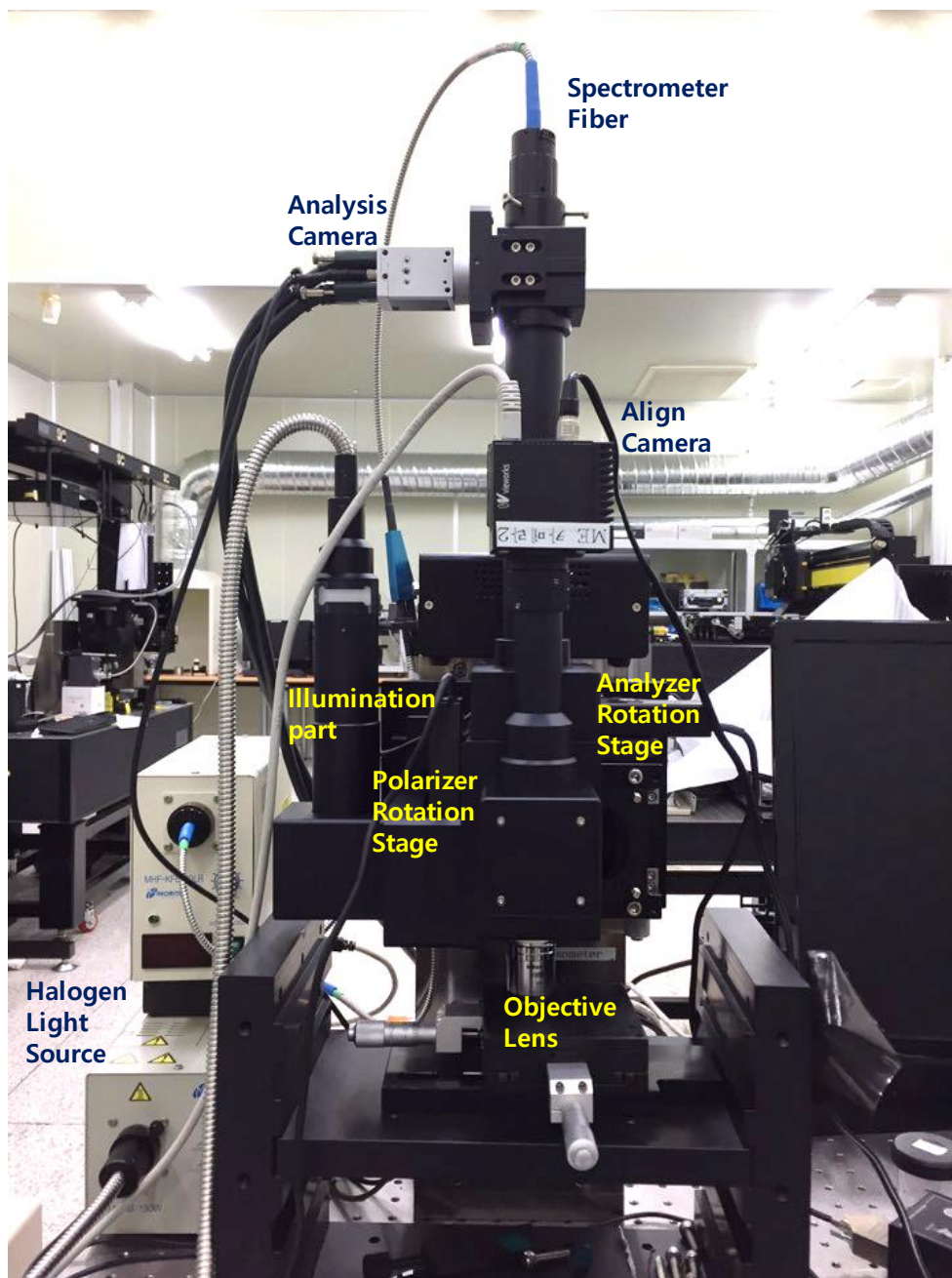
(4. 1)

f 는 튜브렌즈의 초점 거리이고 d 는 핀홀의 직경, 그리고 θ 는 핀홀을 통과하는 빛 만을 기준으로 봤을 때의 대물 렌즈 및 편광판으로 진입하는 빛의 화각이다. 광학계에서 사용하는 튜브렌즈의 초점 거리가 100mm 이기 때문에 핀홀의 직경을 3mm 로 정하면 편광판으로 들어가는 빛의 입사각은 화각의 절반이 되며, 위의 수식에 의해 0.86° 가 된다. 그 결과 4.2.3 절에서 선정한 편광판의 Acceptance angle 인 1.6° 이내를 충족시키기 때문에 핀홀을 통과하는 빛은 완전 편광 된 상태로 통과하게 된다.

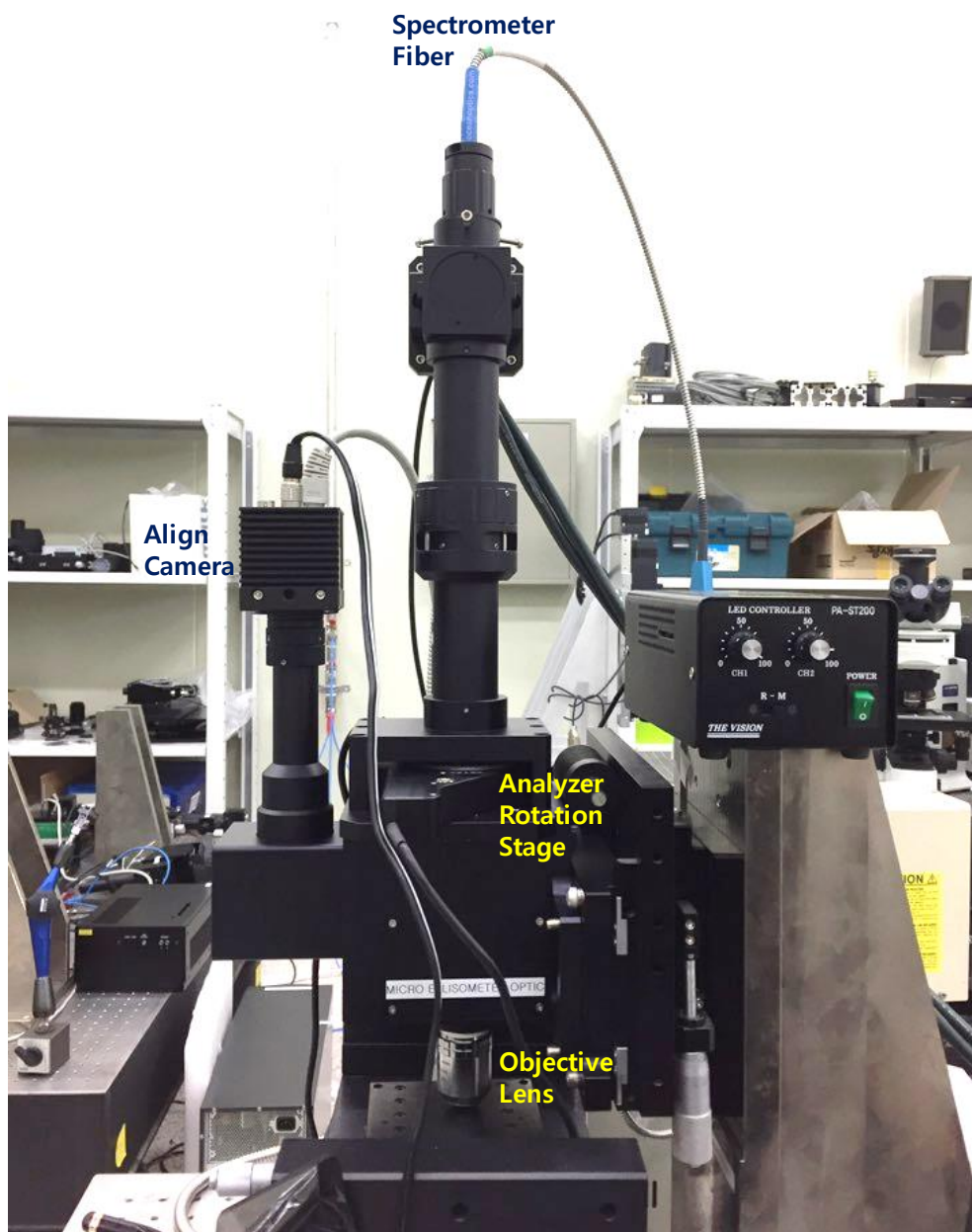
측정 스팟 영역의 크기는 핀홀의 직경과 광학계의 배율로 결정이 된다. 4.2.5 절에서 대물 렌즈의 배율이 100x 였고, 광학계에 사용된 튜브 렌즈 배율은 0.5x 이며 핀홀의 직경이 3mm 이므로 측정 영역 직경의 크기는 $3 / (100 * 0.5) = 0.06 \text{ (mm)} = 60 \text{ (um)}$ 가 된다. 핀홀의 직경을 줄인 다면 측정 영역을 더욱 줄일 수 있지만 출사동 면에서 검출 되는 광량이 부족한 현상이 생겨서 더 이상 줄일 수는 없었다. 만약에 150W 의 텅스텐-할로젠 램프보다 더 출력이 높은 메탈 할라이드(Metal-halide) 램프나 제논(Xenon) 램프를 사용 한다면 광량을 더 많이 확보 할 수 있기 때문에 더 작은 핀홀을 사용해서 측정 영역의 직경을 좀 더 줄일 수 있다.

4.3. 실제 광학계 제작

앞의 개요도와 선정된 부품들을 이용해서 실제 제작된 광학계는 다음과 같다. <그림 4. 9>는 제작된 광학계의 정면 사진이고, <그림 4. 10>은 측면 사진이다.



<그림 4. 9 실제 제작된 광학계의 정면 사진>

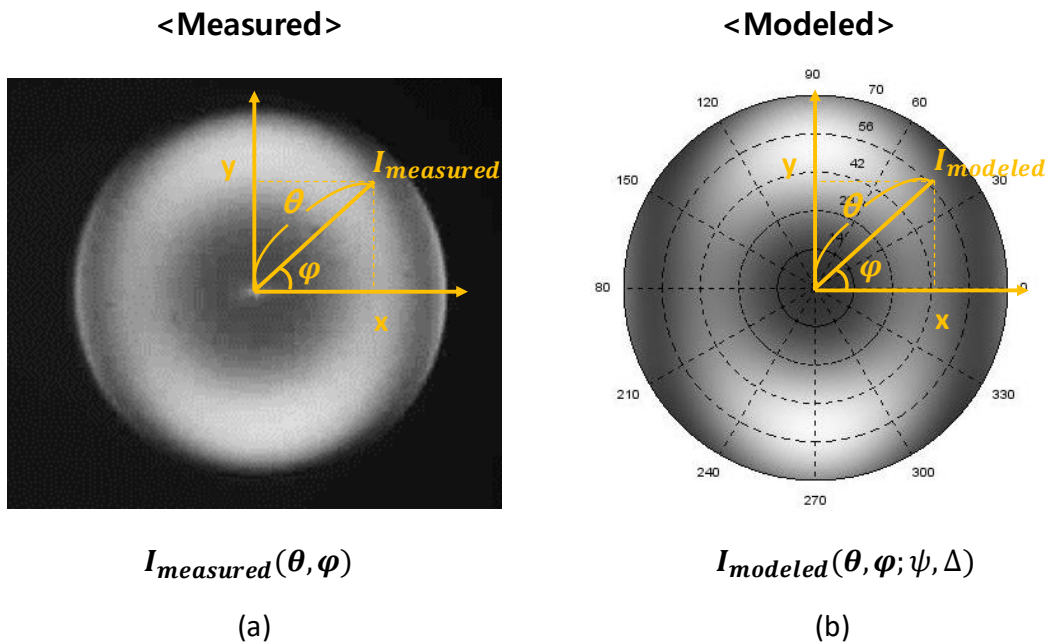


<그림 4. 10 실제 제작된 광학계의 측면 사진>

제 5 장 마이크로 분광 타원계의 해석

5.1. 개요

앞 장에서 구성된 마이크로 분광 타원계에서는 Polarizer 를 회전시켜 가면서 출사동 면 특정 위치의 빛을 스펙트로미터로 분광 시켜서 얻는다. 결과적으로 Polarizer 의 회전에 따라 변화하는 파장 별 광 강도 신호를 얻게 되는데 여기서 얻은 광 강도를 이용해서 타원 파라미터를 분석 할 수 있는 방법이 필요하다. 실제로 출사동의 반지름과 방위각에 따른 광 강도 신호를 이론적으로 모델링하는 것이 가능하며 이는 박막의 타원 파라미터에 관련된 식으로 표현된다.



<그림 5. 1 출사동의 광 강도 모델링>

(a) 측정된 출사동 광 강도 (b) 모델링 된 출사동 광 강도

이 장에서는 광 강도 신호를 정확하게 모델링 할 수 있는 식을 만들고, 구성된 광학계로 측정한 광 강도 신호와 모델링 된 신호의 비교를 통해 샘플의 타원 파라미터를 분석 하고 박막을 측정 할 수 있는 기반을 마련한다.

5.2. Polarizer의 회전에 따른 출사동의 광 강도 모델링

앞 장에서 구성된 광학계에서 Polarizer 의 회전에 따라 출사동의 특정 반지름 및 방위각에서 검출 되는 전기장은 다음과 같다.

$$E_{out}(\theta, \varphi, \lambda, \omega) = T_{t,BS} T_A T_{t,BS}^T T_{t,BS} R_\varphi T_S R_\varphi T_{r,BS} T_P E_{in} \quad (5.1)$$

$$E_{in} = \begin{pmatrix} E_{in,x} \\ E_{in,y} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

E_{in} 은 광원으로부터 나오는 전기장이며 센서에 검출되는 전기장 E_{out} 을 구하기 위해서는 앞 장에서 산출한 방법(식 2.13, 2.19)과 마찬가지로 E_{in} 에 빛이 순차적으로 통과하는 광학 부품의 Jones Matrix 를 차례로 곱해 주면 된다. T_P 는 Polarizer 에 의한 편광 상태 변환 행렬이며 Polarizer 가 각속도 ω 로 회전 한다고 할 때, 시간 t 와 초기 오프셋 각도 P 에 대한 식으로 아래와 같이 표현된다.

$$T_p = R(-(\omega t - P)) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} R(\omega t - P) \quad (5.3)$$

(식 5.2)와 (식 5.3)의 곱은 아래와 같이 간단히 정리 될 수 있다.

$$T_p E_{in} = R(-(\omega t - P)) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} R(\omega t - P) \begin{pmatrix} E_{in,x} \\ E_{in,y} \end{pmatrix} = R(-(\omega t - P)) \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

$T_{r,BS}$ 는 빔 스플리터에서의 반사로 인한 편광 상태 변환 행렬이며 다음과 같이 표현된다.

$$T_{r,BS} = \begin{pmatrix} r_{BS,p} & 0 \\ 0 & r_{BS,s} \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

$r_{BS,p}$ 와 $r_{BS,s}$ 는 각각 p 파, s 파에 대한 빔 스플리터의 반사 계수다. R_φ 는 대물 렌즈의 방위각에 의한 좌표계 회전 변환 행렬이며 (식 2.13e)에 φ 를 대입한 것과 같다. T_s 는 빛이 샘플을 맞고 나올 때의 변환 행렬로써 박막의

총 반사계수로 표현되는 행렬이라는 점에서는 (식 2.19c)와 같지만 새롭게 제안된 마이크로 분광 타원계에서는 파장에 대한 변수가 포함된 행렬이 된다.

$$T_s(\theta, \lambda) = \begin{pmatrix} R_p(\theta, \lambda) & 0 \\ 0 & R_s(\theta, \lambda) \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

$T_{t,BS}$ 는 빔 스플리터에서의 빛의 투과로 인한 편광 상태 변환 행렬이며 p 파, s 파에 대한 빔 스플리터의 투과 계수를 포함한다.

$$T_{t,BS} = \begin{pmatrix} t_{BS,p} & 0 \\ 0 & t_{BS,s} \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

광학계에는 총 3 개의 빔 스플리터가 존재하는데 4.2.4 절에서 편광에 따른 투과율 차이를 상쇄시키기 위해 첫번째와 두번째 빔 스플리터의 입사면이 90° 차이 나게 회전시켜서 편광에 의한 투과율 편차를 상쇄시켰다. 결과적으로 첫번째, 두번째 빔 스플리터에서의 투과는 편광 상태가 변화하는 것을 고려할 필요가 없으며 (식 5.1)에 포함된 관련 요소는 다음과 같이 상쇄된다.

$$T_{t,BS}^T T_{t,BS} = \begin{pmatrix} t_{BS,s} & 0 \\ 0 & t_{BS,p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{BS,p} & 0 \\ 0 & t_{BS,s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{BS,p} t_{BS,s} & 0 \\ 0 & t_{BS,s} t_{BS,p} \end{pmatrix} = kI$$

$$k = t_{BS,p} t_{BS,s}$$
(5.8)

T_A 는 Analyzer 에 의한 편광 상태 변환 행렬이며 (식 2.19b)와 같다.
 앞의 식들을 (식 5.1)에 대입하고 전개 하면 다음과 같다.

$$E_{out}(\theta, \varphi, \lambda, \omega) = k \begin{pmatrix} t_{BS,p} & 0 \\ 0 & t_{BS,s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 A & \cos A \sin A \\ \cos A \sin A & \sin^2 A \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R_p \cos^2 \varphi - R_s \sin^2 \varphi & \cos \varphi \sin \varphi (R_p + R_s) \\ -\cos \varphi \sin \varphi (R_p + R_s) & -R_p \sin^2 \varphi + R_s \cos^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{BS,p} E_0 \cos(\omega t - P) \\ r_{BS,s} E_0 \sin(\omega t - P) \end{pmatrix}$$
(5.9)

여기서 Analyzer 의 오프셋 각이 입사면에 0° 라고 가정하면 ($A = 0$)
 다음과 같이 정리 된다.

$$E_{out}(\theta, \varphi, \lambda, \omega)$$

$$= k \begin{pmatrix} t_{BS,p} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_p \cos^2 \varphi - R_s \sin^2 \varphi & \cos \varphi \sin \varphi (R_p + R_s) \\ -\cos \varphi \sin \varphi (R_p + R_s) & -R_p \sin^2 \varphi + R_s \cos^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{BS,p} E_0 \cos(\omega t - P) \\ r_{BS,s} E_0 \sin(\omega t - P) \end{pmatrix}$$
(5.10)

그리고 스펙트로미터가 받는 빛의 스팟 위치가 출사동에서 방위각 45° 또는 225° 위치에 있다고 가정하면 ($\varphi = \frac{\pi}{4}$ or $\frac{5\pi}{4}$) 검출되는 전기장 식은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned}
 & E_{\text{out}}(\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4}) \\
 &= \frac{1}{2} k E_0 \left(\begin{aligned} & \{\cos(\omega t - P) u + \sin(\omega t - P) v\} + i \{\cos(\omega t - P) x + \sin(\omega t - P) y\} \\ & 0 \end{aligned} \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

$$\begin{aligned}
 u &= |t_{\text{BS},p}| |r_{\text{BS},p}| (p \cos \delta_{t,\text{BS},p} - q \sin \delta_{t,\text{BS},p}) \\
 v &= |t_{\text{BS},p}| |r_{\text{BS},s}| (r \cos \delta_{t,\text{BS},p} - s \sin \delta_{t,\text{BS},p}) \\
 x &= |t_{\text{BS},p}| |r_{\text{BS},p}| (p \sin \delta_{t,\text{BS},p} + q \cos \delta_{t,\text{BS},p}) \\
 y &= |t_{\text{BS},p}| |r_{\text{BS},s}| (r \sin \delta_{t,\text{BS},p} + s \cos \delta_{t,\text{BS},p})
 \end{aligned}
 \tag{5.11a}$$

$$\begin{aligned}
 p &= c \cos \delta_{r,\text{BS},p} - d \sin \delta_{r,\text{BS},p} \\
 q &= c \sin \delta_{r,\text{BS},p} + d \cos \delta_{r,\text{BS},p} \\
 r &= a \cos \delta_{r,\text{BS},s} - b \sin \delta_{r,\text{BS},s} \\
 s &= a \sin \delta_{r,\text{BS},s} + b \cos \delta_{r,\text{BS},s}
 \end{aligned}
 \tag{5.11b}$$

$$\begin{aligned}
a &= |R_p| \cos \delta_{R_p} + |R_s| \cos \delta_{R_s} \\
b &= |R_p| \sin \delta_{R_p} + |R_s| \sin \delta_{R_s} \\
c &= |R_p| \cos \delta_{R_p} - |R_s| \cos \delta_{R_s} \\
d &= |R_p| \sin \delta_{R_p} - |R_s| \sin \delta_{R_s}
\end{aligned}
\tag{5.11c}$$

(식 5.11)을 이용해 출사동의 광 강도를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
I_{\left(\varphi=\frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4}\right)} &= |\mathbf{E}_{\text{out}} \cdot \mathbf{E}_{\text{out}}^*| \\
&= \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |t_{\text{BS},p}|^2 |r_{\text{BS},s}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + \right. \\
&\quad \left. 2 \tan \psi \cos \Delta) \right) \left[\left\{ 1 + \frac{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) - (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)}{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)} \cos 2(\omega t - \right. \right. \\
&\quad \left. \left. P) + 2 \tan \psi_{r,\text{BS}} \frac{\cos \Delta_{r,\text{BS}} (\tan^2 \psi - 1) + 2 \sin \Delta_{r,\text{BS}} \tan \psi \sin \Delta}{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)} \sin 2(\omega t - P) \right\} \right] \\
&= \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |t_{\text{BS},p}|^2 |r_{\text{BS},s}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + \right. \\
&\quad \left. 2 \tan \psi \cos \Delta) \right) [\{1 + \alpha \cos 2(\omega t - P) + \beta \sin 2(\omega t - P)\}]
\end{aligned}
\tag{5.12}$$

$$\alpha_{(\varphi=\frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4})} = \frac{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) - (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)} \quad (5.12a)$$

$$\beta_{(\varphi=\frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4})} = \frac{2 \tan \psi_{r,BS} \{\cos \Delta_{r,BS} (\tan^2 \psi - 1) + 2 \sin \Delta_{r,BS} \tan \psi \sin \Delta\}}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)} \quad (5.12b)$$

Polarizer 회전에 따른 광 강도 신호는 푸리에 급수 형태의 주기함수가 되며, 그 것의 코사인항과 사인항의 푸리에 계수 (α, β) 는 샘플의 타원 파라미터에 대한 식으로 표현된다. 결국 측정 되는 광 강도 신호를 통해 샘플의 타원 파라미터를 산출 할 수 있게 된다. 푸리에 계수 식에 포함된 $\Delta_{r,BS}$, $\psi_{r,BS}$ 는 빔 스플리터의 반사 타원 파라미터다.

또한 스펙트로미터가 받는 빛의 스팟 위치가 출사동에서 방위각 135° 또는 315° 위치에 있다고 가정하면 ($\varphi = \frac{3\pi}{4}$ or $\frac{7\pi}{4}$) 검출 되는 전기장은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & E_{\text{out}(\varphi=\frac{3\pi}{4} \text{ or } \frac{7\pi}{4})} \\ &= \frac{1}{2} k E_0 \begin{pmatrix} \{\cos(\omega t - P) u - \sin(\omega t - P) v\} \\ 0 \end{pmatrix} + i \{\cos(\omega t - P) x - \sin(\omega t - P) y\} \end{aligned} \quad (5.13)$$

위 식의 u , v , x , y 와 그 안에 포함된 부속 식들은 앞에서의 (식 5.11a)~(식 5.11c)와 같다. 이전과 마찬가지로 (식 5.13)을 이용해 출사동의 광 강도를 구하면 다음과 같다.

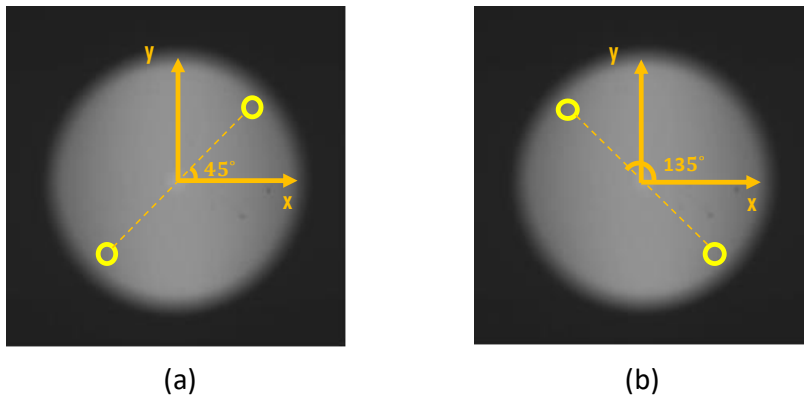
$$\begin{aligned}
I_{\left(\varphi=\frac{3\pi}{4}\text{ or }\frac{7\pi}{4}\right)} &= |\mathbf{E}_{\text{out}} \cdot \mathbf{E}_{\text{out}}^*| \\
&= \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |t_{\text{BS,p}}|^2 |r_{\text{BS,s}}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + \right. \\
&\quad \left. 2 \tan \psi \cos \Delta) \right) \left[\left\{ 1 + \frac{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) - (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)}{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)} \cos 2(\omega t - \right. \right. \\
&\quad \left. \left. P) - 2 \tan \psi_{r,\text{BS}} \frac{\cos \Delta_{r,\text{BS}} (\tan^2 \psi - 1) + 2 \sin \Delta_{r,\text{BS}} \tan \psi \sin \Delta}{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)} \sin 2(\omega t - P) \right\} \right] \\
&= \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |t_{\text{BS,p}}|^2 |r_{\text{BS,s}}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + \right. \\
&\quad \left. 2 \tan \psi \cos \Delta) \right) [\{1 + \alpha \cos 2(\omega t - P) + \beta \sin 2(\omega t - P)\}]
\end{aligned} \tag{5.14}$$

$$\alpha_{\left(\varphi=\frac{3\pi}{4}\text{ or }\frac{7\pi}{4}\right)} = \frac{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) - (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)}{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)} \tag{5.14a}$$

$$\beta_{\left(\varphi=\frac{3\pi}{4}\text{ or }\frac{7\pi}{4}\right)} = \frac{-2 \tan \psi_{r,\text{BS}} \{ \cos \Delta_{r,\text{BS}} (\tan^2 \psi - 1) + 2 \sin \Delta_{r,\text{BS}} \tan \psi \sin \Delta \}}{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)} \tag{5.14b}$$

역시나 Polarizer 의 회전에 따라 스펙트로미터에서 검출 되는 광 강도는 푸리에 급수 형태의 주기 함수가 되며, 그 것의 푸리에 계수는 타원 파라미터에 대한 식으로 표현 된다. $\sin 2\omega$ 항의 푸리에 계수인 β 의 부호가 반대로 바뀌는 것만 제외하면 식은 앞에서의 경우 ($\varphi = \frac{\pi}{4}$ or $\frac{5\pi}{4}$) 와 거의 비슷하다.

결국 출사동 면 상의 방위각 $\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}$ 위치에 스펙트로미터가 받는 빛의 스팟을 위치시키고, Polarizer 의 회전에 따라 얻은 빛의 광 강도는 푸리에 급수 형태의 주기 함수가 되며 함수의 푸리에 계수는 측정하는 샘플의 타원 파라미터(Δ, ψ)에 대한 식으로 표현된다. 그래서 측정 된 광 강도의 푸리에 계수를 통해 타원 파라미터를 얻고 박막을 측정 할 수 있음을 알 수 있다.



<그림 5. 2 출사동 면에서의 스펙트로미터 스팟 위치 정렬>

(a) 방위각 45° 또는 225° (b) 방위각 135° 또는 315°

5.3. 편광판의 위치각 정렬

5.2 절에서의 광 강도 신호의 모델링 방법은 입사면에 대한 Polarizer 의 초기 오프셋 각도와 Analyzer 의 오프셋 각도를 모두 0 이라고 가정한 조건에서 식을 산출 했다. 만약 실제 오프셋 각도가 0 이 아니라면 광학계에서 검출되는 신호는 앞의 모델링 식을 따르지 않게 되고 측정 오차의 요인이 된다. 그래서 편광판의 위치각을 정확하게 판별하고 오프셋 각도를 0 도에 정렬 하는 것이 중요 하다. 대개 편광판에 빛을 편광 시키는 축이 표시 되어 있지만 그것 만으로는 정밀하게 맞추는 것이 힘들다.

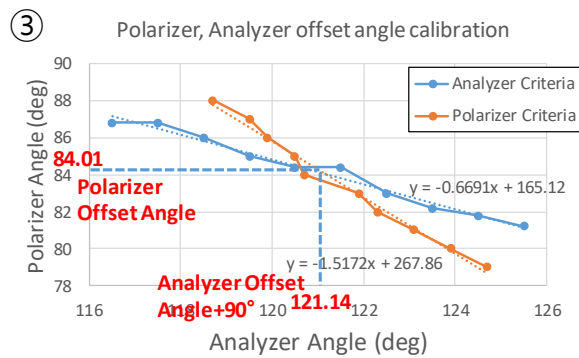
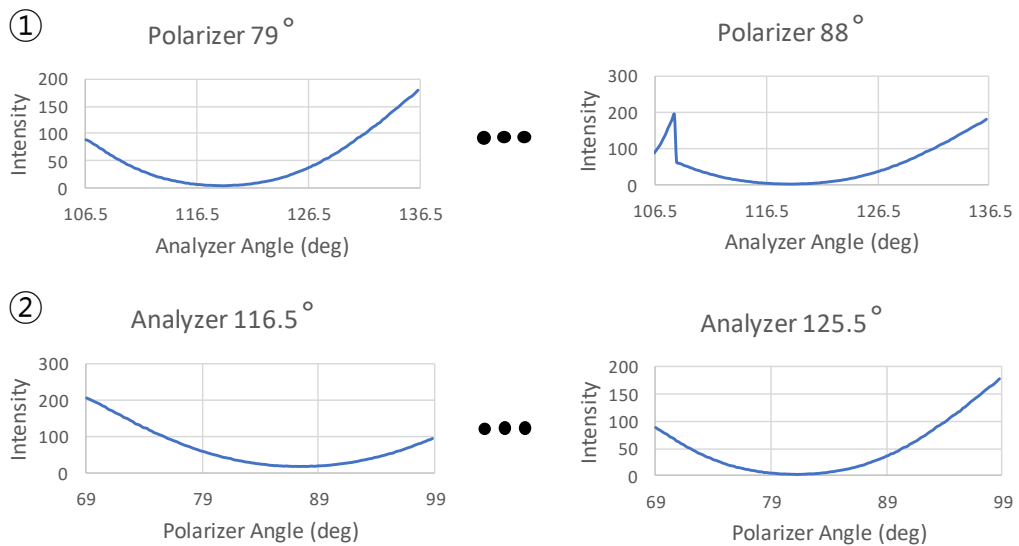
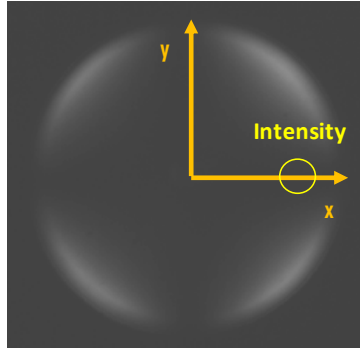
편광판은 회전 스테이지를 통해 회전 하게 되는데 스테이지 인코더(Encoder)의 영점 위치에서 빛의 입사면에 대한 편광판의 상대 위치 각을 정확히 결정 할 수 있어야 한다. 이를 기준으로, 광 강도를 얻기 시작할 때 편광판의 각도를 입사면에 평행하게 이송을 해줘서 실제 오프셋 각도를 0 으로 맞출 수가 있다. 앞서 출사동 면에서의 광 강도를 모델링 하기 위해 사용했던 전기장 수식(식 5.9)을 살펴 보자

$$E_{out}(\theta, \varphi, \lambda, \omega) = k \begin{pmatrix} t_{BS,p} & 0 \\ 0 & t_{BS,s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 A & \cos A \sin A \\ \cos A \sin A & \sin^2 A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_p \cos^2 \varphi - R_s \sin^2 \varphi & \cos \varphi \sin \varphi (R_p + R_s) \\ -\cos \varphi \sin \varphi (R_p + R_s) & -R_p \sin^2 \varphi + R_s \cos^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{BS,p} E_0 \cos(\omega t - P) \\ r_{BS,s} E_0 \sin(\omega t - P) \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

여기서 $\omega t - P \rightarrow 0^\circ$, $A \rightarrow 90^\circ$, $\varphi \rightarrow 0$ 로 각각 수렴 한다고 할 때 E_{out} 은 0 으로 수렴하며 따라서 광 강도 I_{out} 역시 0 으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 결과 적으로 Polarizer 가 0° , Analyzer 가 90° 에 가까워 질수록 출사동 이미지에서 방위각 0° 상에 있는 지점의 광 강도는 0 으로 수렴하게 된다.

위와 같은 사실을 근거로 Polarizer 의 각도를 0° 로 추정 되는 위치 기준으로 조금씩 각도를 변화시키고 역시나 Analyzer 의 각도를 90° 로 추정 되는 위치 기준으로 조금씩 각도를 변화 시켜 가면서 방위각 0° 위치의 광 강도 변화를 관찰 한다. 그래서 광 강도가 가장 낮아 지는 조건을 찾으면 그때의 위치가 Polarizer 는 빛의 입사면에 0° , Analyzer 는 90° 가 되는 지점이라고 볼 수 있다. 구체적인 순서는 다음과 같다.

1. Polarizer 의 각도를 0° 로 예상되는 지점을 중심으로 $\pm 5^\circ$ 범위 안에서 1° 간격으로 변화 시켜 가며, 그때 마다 Analyzer 를 90° 로 예상 되는 위치 근처에서 움직여 출사동 방위각 0° 상의 빛의 밝기가 최소가 되는 Analyzer 의 인코더 값들을 기록한다.
2. 이번엔 반대로 Analyzer 의 각도를 90° 로 예상 되는 지점을 중심으로 $\pm 5^\circ$ 범위 안에서 1° 간격으로 변화 시켜 가며, 그때 마다 Polarizer 를 0° 로 예상 되는 위치 근처에서 움직여 출사동 방위각 0° 상의 빛의 밝기가 최소가 되는 Polarizer 의 인코더 값들을 기록한다.
3. 1, 2 번 과정을 통해 두 개의 직선을 얻을 수 있는데 실제 Analyzer 의 90° 위치와 Polarizer 의 0° 위치가 탐색 범위 안에 있다면 교차점이 생기게 된다. 그 점에서의 인코더 좌표가 실제로 빛의 입사면에 대해 Analyzer 오프셋 각이 90° , Polarizer 오프셋 각이 0° 인 위치가 된다.



<그림 5.3 편광판 위치각 정렬 작업>

5.4. 측정된 광 강도에서의 푸리에 계수 산출

앞 절에서는 4 장에서 구성된 광학계에서 Polarizer 회전에 따른 광 강도 신호 함수를 모델링 할 수 있는 식을 완성 했으며, 그 함수의 푸리에 계수를 측정 샘플의 타원 파라미터로 표현 할 수 있음을 보였다. 푸리에 계수 모델링 식의 활용을 위해선 우선 비교 기준이 되는 푸리에 계수 측정 신호를 얻을 수 있어야 한다. 앞 절에서의 모델링 식을 근거로, Polarizer 를 ω 의 각속도로 회전 하면서 얻은 광 강도는 $\cos 2\omega$ 과 $\sin 2\omega$ 항이 포함된 주기 함수로 나타남을 알 수 있다. 그래서 푸리에 계수 측정 신호를 얻으려면 Polarizer 회전에 따른 광 강도 신호를 검출하고, 그 신호에서 $\cos 2\omega$ 항과 $\sin 2\omega$ 항의 푸리에 계수를 산출하면 된다. 이는 일반적으로 주기함수에서 푸리에 계수를 산출 하는 방법과 같으며 Polarizer 를 회전 하면서 등 간격의 각도로 데이터를 얻는다고 할 때 다음 식을 통해 얻을 수 있다.

$$I_M = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \quad (5.15a)$$

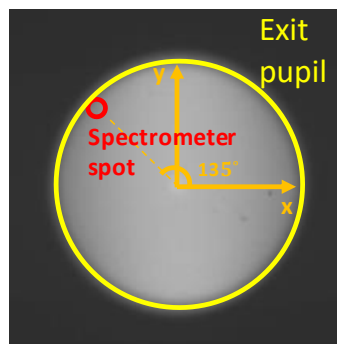
$$\alpha_{measured} = \frac{2}{N * I_M} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \cos\left(\frac{2\pi}{T} * i\right) \quad (5.15b)$$

$$\beta_{measured} = \frac{2}{N * I_M} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \sin\left(\frac{2\pi}{T} * i\right) \quad (5.15c)$$

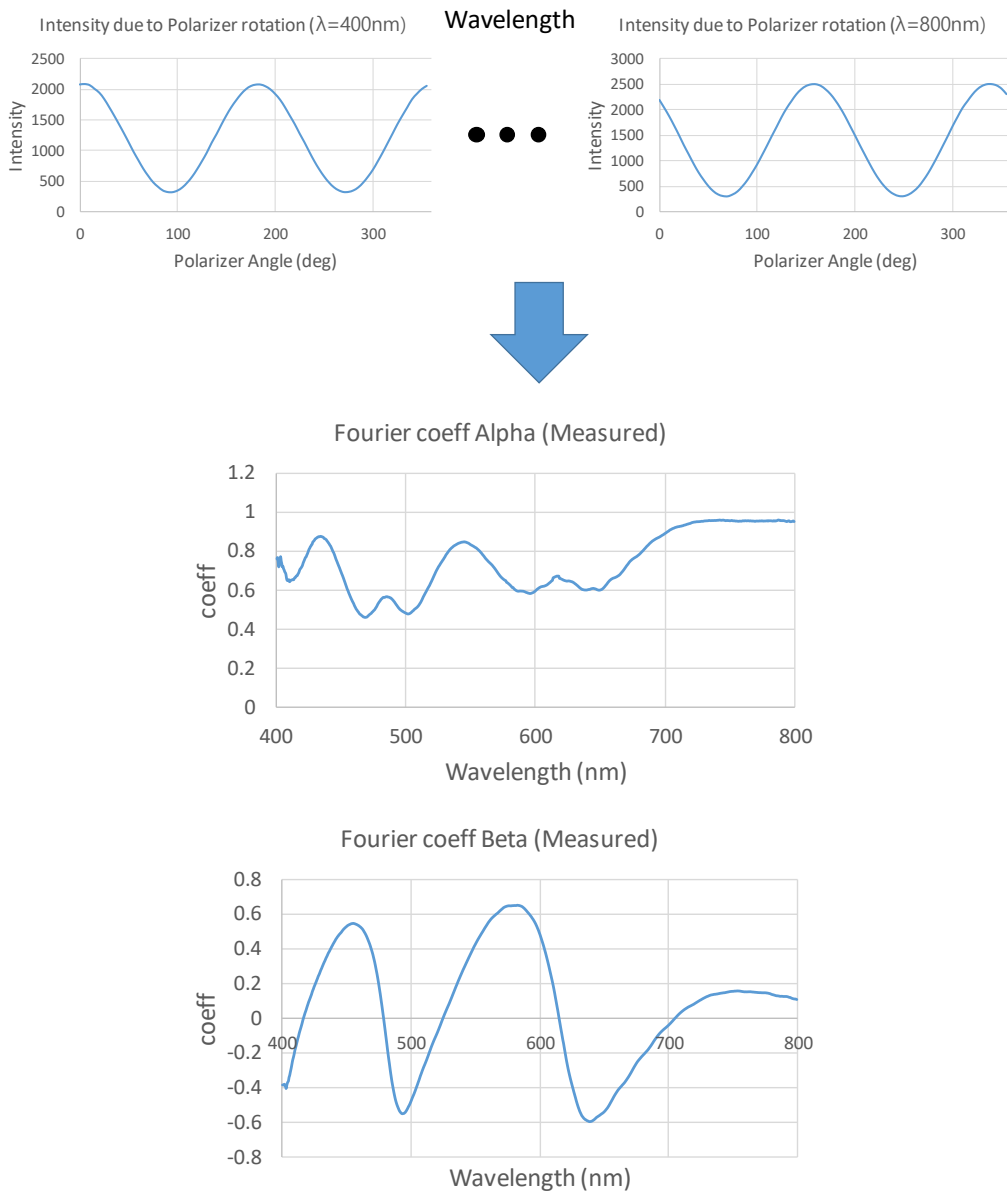
N 은 Polarizer 를 한 바퀴 회전 할 때 얻는 데이터의 총 개수이며, I_i 는 i 번째의 광 강도 데이터이다. (식 5.15a)는 전체 광 강도의 평균 값을 구하는 수식이며 I_M 는 평균 광 강도가 된다. T 는 광 강도 변화의 한 주기 안에 포함되는 데이터 개수이다. 이를 가지고 (식 5.15b)를 통해 $\cos 2\omega$ 항의 푸리에 계수 측정 값($\alpha_{measured}$), (식 5.15c)를 통해 $\sin 2\omega$ 항의 푸리에 계수 측정 값($\beta_{measured}$)을 구할 수 있다.

실제 Si 위에 SiO_2 가 9200Å 쌓여 있는 샘플에서 스펙트로미터 스팟 중심을 출사동 면 상의 방위각이 135° , 빛의 입사각이 61° (반지름 1.7mm)가 되는 위치에 두었을 때, 400~800nm 파장범위에 걸쳐 측정된 푸리에 계수는 <그림 5. 5>와 같다.

스펙트로미터 스팟 위치를 이렇게 정렬한 이유는 입사각 61° 의 경우 스펙트로미터에서 검출되는 광량을 최대한 확보할 수 있으면서도 입사각을 가능한 한 늘린 조건인데, 다르게 말하면 스팟 영역이 출사동 영역에 완전히 포함되면서 내접하는 조건이었고, 방위각 135° 는 위의 입사각을 맞춰야 하는 상황에서 $\frac{\pi}{4}$, $\frac{3\pi}{4}$, $\frac{5\pi}{4}$, $\frac{7\pi}{4}$ 의 방위각 중에 광학계의 제작 상태에 의해 스팟의 배치가 가장 용이한 각도였기 때문이다. 앞으로의 연구 과정은 스펙트로미터 스팟 위치를 항상 이 조건으로 맞춰서 수행 했다.(<그림 5. 4>)



<그림 5. 4 이번 연구에서 기준이 되는 스펙트로미터 스팟 위치>



<그림 5. 5 Polarizer의 회전에 따른 파장 별 광 강도 신호 및 측정 된 푸리에 계수>

5.5. 모델링 신호 오차 보정

5.5.1. 빔 스플리터의 타원 파라미터 물성치 보정

앞 절에서 산출된 광 강도 (식 5.12), (식 5.14)는 측정 하려는 박막의 타원 파라미터 뿐만 아니라 광학계에 포함 된 빔 스플리터의 반사 타원 파라미터 ($\Delta_{r,BS}$, $\psi_{r,BS}$) 또한 포함 되어 있다. 이는 빛의 파장에 따라 변하는 물성치로서 마이크로 타원계의 광원을 단파장에서 다파장으로 확장 시킴에 따라 새롭게 발생한 변수들이다. 푸리에 계수의 정확한 모델링을 위해선 빔 스플리터의 물성치를 정확히 결정 하는 것이 중요하다. (식 5.12), (식 5.14)을 통해 $\tan \psi_{r,BS}$ 및 $\Delta_{r,BS}$ 를 표현 할 수 있는 식을 만들 수 있다.

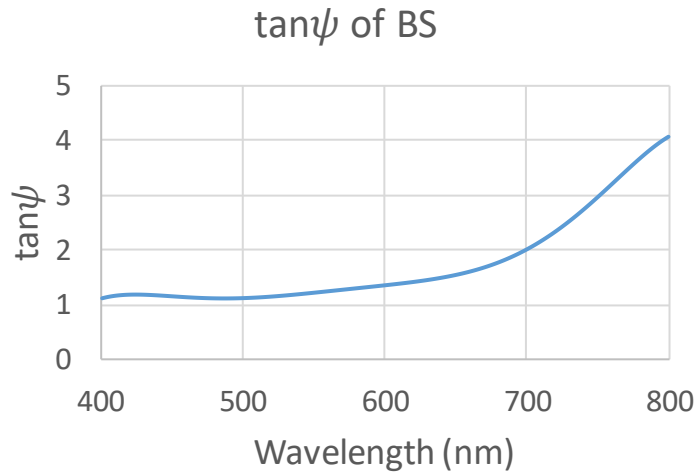
$$\tan \psi_{r,BS}(\lambda) = \sqrt{\frac{-(1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta) - \alpha(1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta)}{-(1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + \alpha(1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta)}} \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{r,BS}(\lambda) &= \tan^{-1} \frac{2 \tan \psi \sin \Delta}{\tan^2 \psi - 1} \\ &+ \cos^{-1} \left(\frac{\beta \{ \tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi - 2 \tan \psi \cos \Delta) + (1 + \tan^2 \psi + 2 \tan \psi \cos \Delta) \}}{2p \tan \psi_{r,BS} \sqrt{4 \tan^2 \psi \sin^2 \Delta + (\tan^2 \psi - 1)^2}} \right) \end{aligned}$$

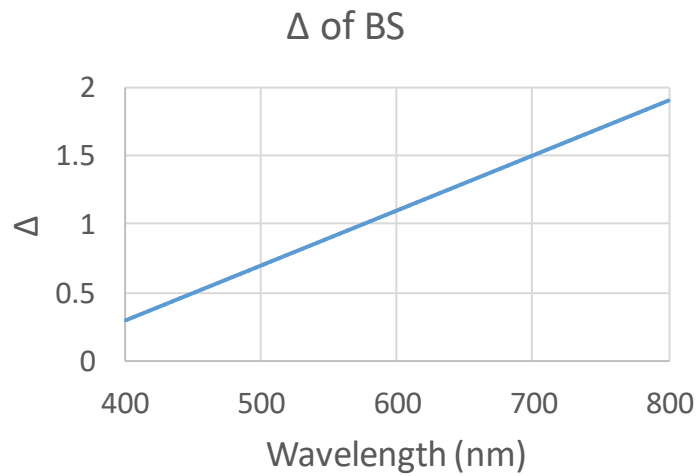
$$p = \begin{cases} 1 & (\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4}) \\ -1 & (\varphi = \frac{3\pi}{4} \text{ or } \frac{7\pi}{4}) \end{cases} \quad (5.17)$$

(식 5.16)의 우변은 측정 샘플의 타원 파라미터(Δ, ψ) 및 푸리에 계수 α 로 모든 게 표현이 되며 결국 타원 파라미터를 정확히 알고 있는 샘플을 광학계로 측정해서 푸리에 계수 α 를 얻으면 $\tan \psi_{r,BS}$ 를 산출 할 수 있다. 그리고 (식 5.17)의 우변은 측정 샘플의 타원 파라미터(Δ, ψ) 및 푸리에 계수 β 뿐 아니라 $\tan \psi_{r,BS}$ 항이 포함 되어 있는데 이는 (식 5.16)를 통해서 산출 할 수 있으므로 역시나 $\Delta_{r,BS}$ 를 산출 할 수 있다.

광학계를 제작 할 때마다 빔 스플리터의 물성치는 미세 하게 변화 할 수 있다. 하지만 타원 파라미터를 정확히 알고 있는 샘플의 푸리에 계수 측정 값과 (식 5.16), (식 5.17)를 통해 그때마다 보정을 해줄 수 있다. 이러한 방법을 이용하여 얻은 빔 스플리터의 반사 타원 파라미터 물성치는 다음과 같다.



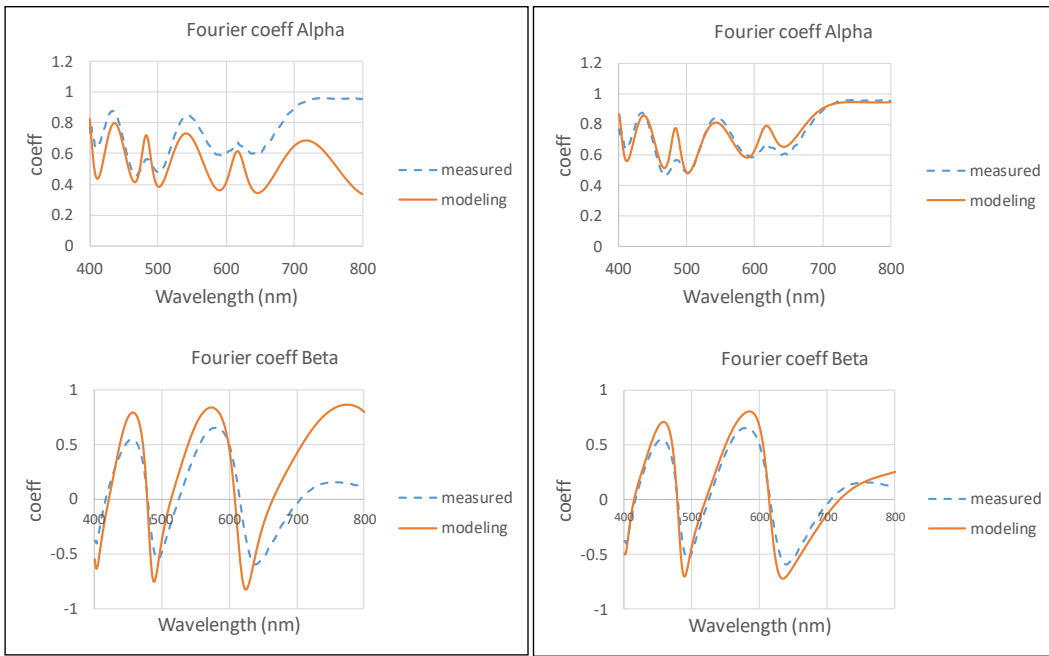
<그림 5. 6 파장에 따른 빔 스플리터의 $\tan\psi$ 그래프>



<그림 5. 7 파장에 따른 빔 스플리터의 Δ 그래프>

<그림 5. 6>, <그림 5. 7>과 같이 다파장에 대한 빔 스플리터의 물성치를 얻고 나면 푸리에 계수 α, β 를 정확하게 모델링 할 수 있다. Si 기판 위에 SiO_2 가 9200Å 쌓여 있는 샘플에서 스펙트로미터 스팟 중심을 출사동면

상의 방위각이 135° , 빛의 입사각이 61° (반지름 1.7mm)가 되는 위치에 뒀을 때 측정된 푸리에 계수 신호와 이제까지 제안한 방법을 이용해 모델링한 신호를 비교해 보았다. 두 가지 경우를 살펴보았는데, 빔 스플리터가 빛의 편광 상태에 영향을 미치지 않는 이상적 조건으로 생각해서 $\psi_{r,BS}(\lambda) = 1$, $\Delta_{r,BS}(\lambda) = 0$ 을 대입했을 때와 앞에서 구한 실제 타원 파라미터 물성치를 대입하여 보정했을 때를 <그림 5. 8>에 각각 나타냈다. 결과적으로 빔 스플리터의 실제 물성치를 제대로 보정했을 때의 모델링 신호가 이상적 물성치를 반영했을 때보다 측정 신호에 훨씬 더 가까워 지는 것을 볼 수 있다. 하지만 일부 피크 지점의 경우는 여전히 절대 값이 잘 맞지 않는 모습을 보인다.



(a)

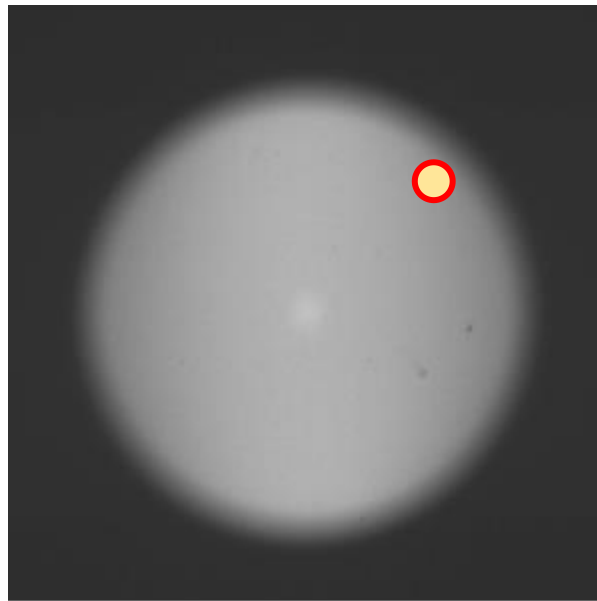
(b)

<그림 5. 8 빔 스플리터 물성치 보정 효과 비교>

(a) 이상적인 물성치를 대입 했을 때 (b) 실제 물성치를 대입 했을 때

5.5.2. 스펙트로미터 스팟 영역에 의한 효과 보정

출사동 면으로부터 스펙트로미터로 받는 빛의 영역은 실제로는 완전한 점이 아니다. 원 형상의 일정 한 영역을 가지고 있으며 이는 스펙트로미터와 광학계 사이를 연결하는 옵틱 파이버의 홀 직경과 연관이 있다.

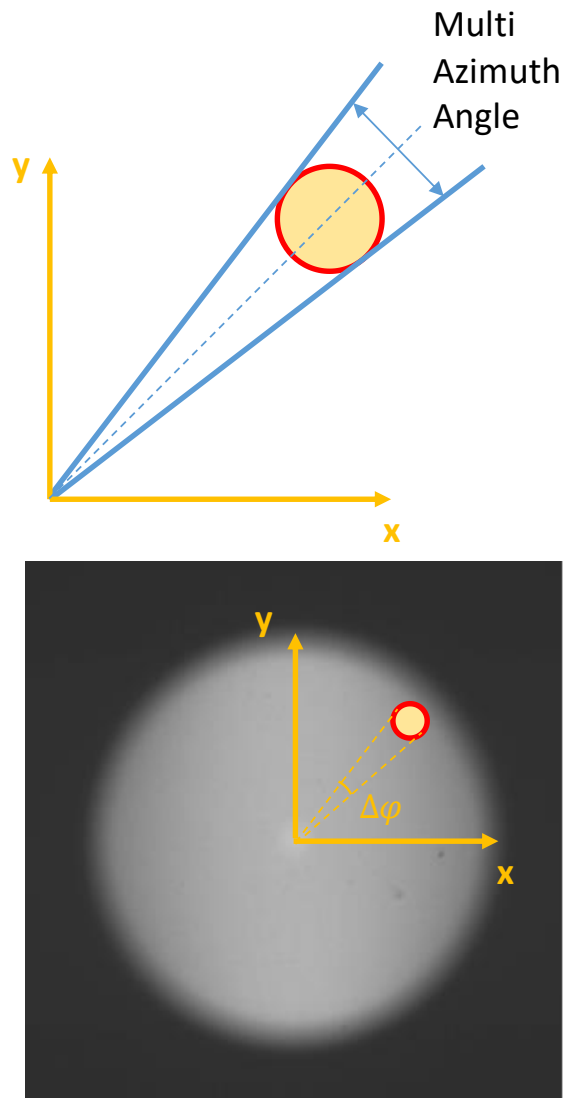


<그림 5. 9 출사동 면에서의 스펙트로미터 스팟 영역>

이는 방위각과 입사각에 모두 영향을 준다. 그래서 실제로 스펙트로미터로 들어가는 빛은 하나의 방위각과 입사각을 가지는 게 아니라 원의 영역에 의한 범위만큼 다양한 각도의 빛이 모두 들어가게 된다. 다음은 스펙트로미터의 스팟 영역에 의해 생기는 다중 방위각 효과와 다중 입사각 효과의 영향을 살펴보고 보정 할 수 있는 방법을 제시 하였다.

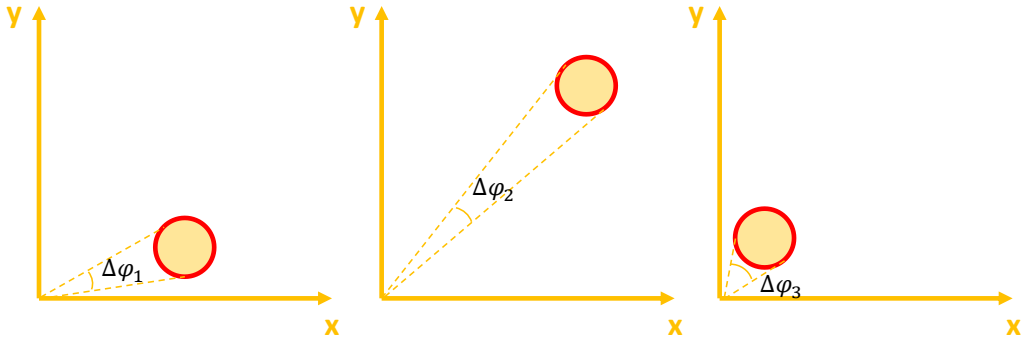
5.5.2.1. 다중 방위각 효과 보정

<그림 5. 10>은 스펙트로미터의 스팟 영역에 의한 방위각의 적분 범위를 나타낸 그림이다. 출사동 이미지에서 여러 방위각 ($\Delta\varphi$)의 빛이 합성 되는 것을 볼 수 있다.



<그림 5. 10 스팟의 영역에 의한 다중 방위각 빛의 합성>

<그림 5. 11>을 보면 스팟이 위치한 좌표가 바뀔에 따라 방위각의 적분 범위는 제 각각이 되는 것을 알 수 있다. 그래서 만약 다중 방위각에 의한 영향이 존재한다면 스팟의 위치가 조금만 달라져도 적분 범위가 달라지게 되어 보정하기가 어려워진다.



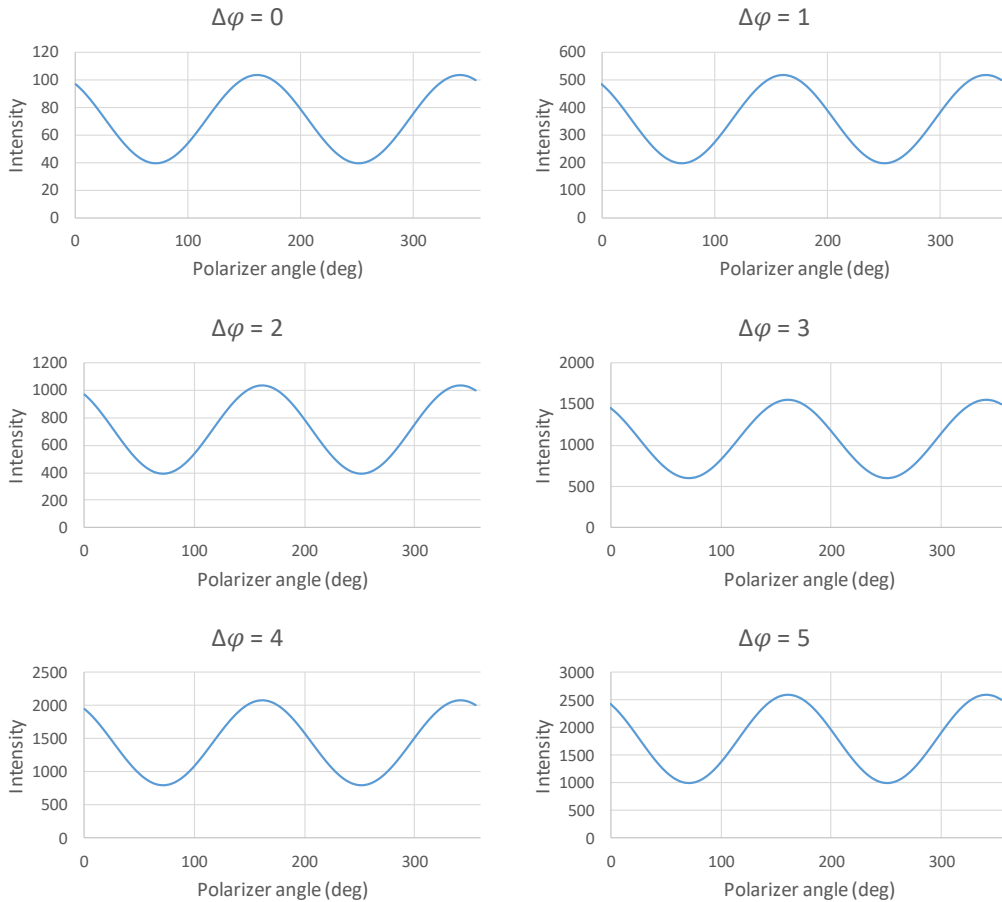
$$\Delta\varphi_1 \neq \Delta\varphi_2 \neq \Delta\varphi_3$$

<그림 5. 11 스팟의 위치에 따른 방위각 적분 범위의 변화>

스팟 영역에 의한 다중 범위각의 영향을 알아보기 위해 시뮬레이션을 실시 했다. 방위각의 범위가 중심 방위각으로부터 $\pm \frac{\Delta\varphi}{2}$ 라고 할 때, 우선 출사동의 전기장 모델링 (식 5.1)에서 다중 방위각의 적분을 고려해 새롭게 표현한 식은 다음과 같다.

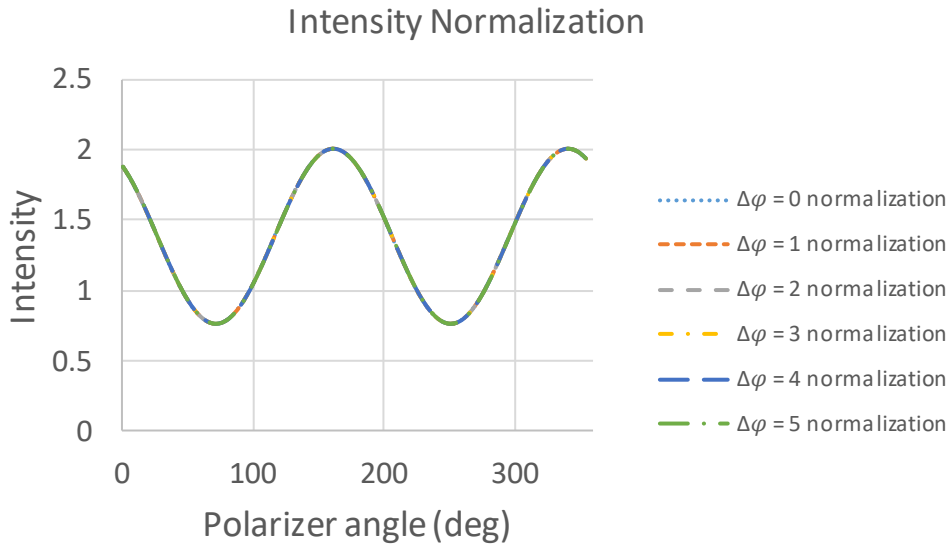
$$E_{\text{out}}(\theta, \varphi, \Delta\varphi, \lambda, \omega) = T_{t,BS} T_A T_{t,BS}^T T_{t,BS} \int_{\varphi - \frac{\Delta\varphi}{2}}^{\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}} R_\varphi T_S \int_{\varphi - \frac{\Delta\varphi}{2}}^{\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}} R_\varphi T_{r,BS} T_p E_{\text{in}} \quad (5.18)$$

그리고 광 강도 식의 정의 $I = |\mathbf{E}_{\text{out}} \cdot \mathbf{E}_{\text{out}}^*|$ 를 이용해 다양한 방위각 적분 범위 ($\Delta\varphi = 0, 1, 2, 3, 4, 5$)에 대해 Polarizer 회전에 따른 광 강도 변화 그래프를 시뮬레이션 한 후, 푸리에 계수를 (식 5.15)를 이용해 직접 산출했다. Si위에 SiO₂가 11240Å 쌓여 있는 샘플에서 스펙트로미터 스팟 중심을 출사동에서 방위각이 135°, 빛의 입사각이 61° (반지름 1.7mm)가 되는 위치에 뒀을 때, 605nm 파장 빛에 대해서 $\Delta\varphi$ 크기 별 광 강도 변화 그래프는 다음과 같다.



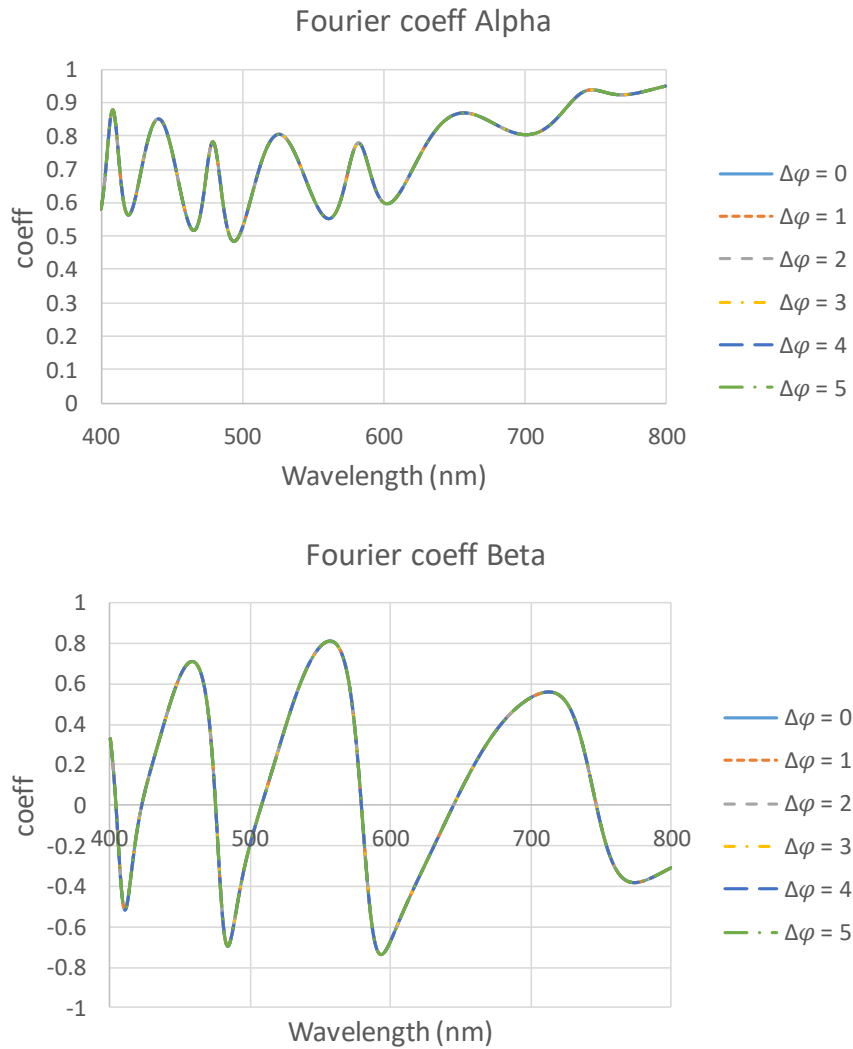
<그림 5. 12 방위각 적분 범위 변화에 따른 광 강도 변화>

방위각의 적분 범위 변화에 따라 광 강도의 절대값은 변하지만 주기는 변함이 없다. 이는 모든 파장의 빛에 대해서 동일한 경향을 보인다. 그래서 위의 그래프들의 최대 진폭을 1로 정규화 시키고 서로 겹쳐서 비교해 보았다.



<그림 5. 13 방위각 적분 범위에 따른 광 강도 정규화 그래프 비교>

방위각의 적분 범위가 변화 하더라도 그래프의 주기는 완벽하게 일치하는 것을 볼 수 있다. 주기 함수의 푸리에 계수는 데이터의 절대 값에는 무관 하고 주기에 의해서만 결정되므로 이를 통해서 방위각의 적분 범위가 변하더라도 신호가 똑같이 나올 것을 유추 할 수 있다. 결과적으로 $\Delta\varphi$ 의 크기에 따른 푸리에 계수 시뮬레이션 결과는 적분 범위에 상관 없이 모두 일치 했다.

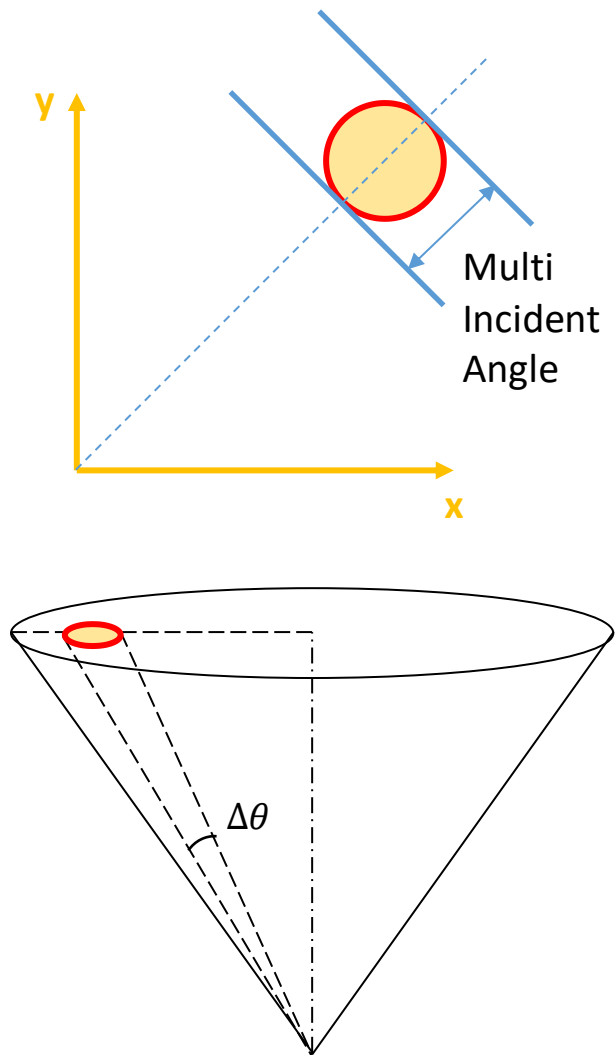


<그림 5. 14 방위각 적분 범위에 따른 푸리에 계수 비교>

결과 적으로 푸리에 계수는 방위각의 적분 범위가 늘어 나도, 단일 중심 방위각에 의해서만 산출 되는 푸리에 계수 결과와 같다는 것을 알 수 있으며 스팟 영역에 의한 다중 방위각 효과는 고려할 필요가 없다고 볼 수 있다.

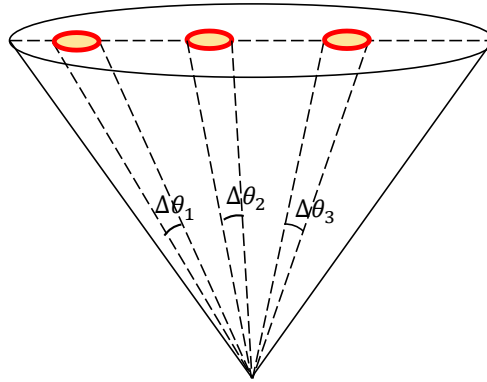
5.5.2.2. 다중 입사각 효과 보정

아래 그림은 스펙트로미터 스팟 영역에 의한 다중 입사각 효과를 나타낸 것이다. 앞서 렌즈 위로 수직 입사한 빛은 실제로는 렌즈의 개구수에 의해 비스듬하게 입사하는 효과가 있다고 했으므로 아래 그림에 따라 스팟의 영역이 존재하면 여러 입사각($\Delta\theta$)의 빛이 합성되는 것을 볼 수 있다.



<그림 5. 15 스팟의 영역에 의한 다중 입사각 빛의 합성>

<그림 5. 16>에서 볼 수 있듯이 다중 방위각 효과와 마찬가지로 스팟의 좌표가 바뀌면 입사 각의 적분 범위는 다 달라지는 것을 알 수 있다. 그래서 스팟의 위치가 바뀔 때 마다, 스팟의 크기와 출사동 중심으로부터의 거리를 고려해 입사각 적분 범위를 계산하여 사용해야 한다.



$$\Delta\theta_1 \neq \Delta\theta_2 \neq \Delta\theta_3$$

<그림 5. 16 스팟의 위치에 따른 입사각의 적분 범위 변화>

다중 입사각 적분 범위를 구하는 과정은 다음과 같다. 이번 연구에서 제작한 광학계에 사용된 옵틱 파이버의 홀 직경은 100um 이다. 사용되는 대물 렌즈의 Clear Aperture 크기는 3.5mm 이므로 출사동의 최대 반지름은 $\frac{3.5}{2} = 1.75$ (mm) 가 된다. 앞서 스펙트로미터 스팟의 중심이 빛의 입사각이 61° 가 되는 반지름 1.7mm 위치에 있었으므로 스팟의 영역에 의한 안쪽 경계 반지름은 $1.7 - \frac{0.1}{2} = 1.65$ (mm), 바깥쪽 경계 반지름은 출사동의 최대 반지름과 같은 $1.7 + \frac{0.1}{2} = 1.75$ (mm) 가 된다. 이 값들과 앞의 (식 2.18)을 이용해, 스팟의 영역에 의해 적분해야 하는 입사 각도의 범위를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\Delta\theta &= \sin^{-1}\left(\frac{\rho_{outer}}{\rho_{max}} \sin \theta_{max}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{\rho_{inner}}{\rho_{max}} \sin \theta_{max}\right) \\
&= \sin^{-1}\left(\frac{1.75}{1.75} \sin(64.1)\right) - \sin^{-1}\left(\frac{1.65}{1.75} \sin(64.1)\right) = 6.1(\text{deg})
\end{aligned}
\tag{5.19}$$

여기서 구한 입사각 적분 범위를 출사동의 전기장을 구하는 (식 5.1)에 반영하면 (식 5.20)와 같이 표현 할 수 있다.

$$E_{out}(\theta, \Delta\theta, \varphi, \lambda, \omega) = T_{t,BS} T_A T_{t,BS}^T T_{t,BS} R_\varphi \int_{\theta - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta + \frac{\Delta\theta}{2}} T_S R_\varphi T_{r,BS} T_P E_{in}
\tag{5.20}$$

위 식을 광 강도 정의 식에 대입하여 식을 전개하면 다음과 같다. 스펙트로미터가 받는 빛의 스팟 중심 위치는 출사동에서 방위각 45° 또는 225° 위치에 있다고 가정한다. ($\varphi = \frac{\pi}{4}$ or $\frac{5\pi}{4}$)

$$\begin{aligned}
I_{\Delta\theta}(\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4}) &= |E_{out} \cdot E_{out}^*| \\
&= \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |t_{BS,p}|^2 |r_{BS,s}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \right. \\
&\quad \left. \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta') \right) \left[\left\{ 1 + \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') - (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')} \cos 2(\omega t - P) + \\
& 2 \tan \psi_{r,BS} \frac{\cos \Delta_{r,BS} (\tan^2 \psi' - 1) + 2 \sin \Delta_{r,BS} \tan \psi' \sin \Delta'}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')} \sin 2(\omega t - P) \Bigg] \\
& = \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |t_{BS,p}|^2 |r_{BS,s}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \right. \\
& \left. \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta') \right) [\{1 + \alpha_{\Delta\theta} \cos 2(\omega t - P) + \beta_{\Delta\theta} \sin 2(\omega t - P)\}]
\end{aligned} \tag{5.21}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha_{\Delta\theta} \left(\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4} \right) \\
& = \frac{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') - (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')}
\end{aligned} \tag{5.21a}$$

$$\begin{aligned}
& \beta_{\Delta\theta} \left(\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4} \right) \\
& = \frac{2 \tan \psi_{r,BS} \{ \cos \Delta_{r,BS} (\tan^2 \psi' - 1) + 2 \sin \Delta_{r,BS} \tan \psi' \sin \Delta' \}}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')}
\end{aligned} \tag{5.21b}$$

$$\psi' = \int_{\theta - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta + \frac{\Delta\theta}{2}} \psi(\theta) d\theta \tag{5.21c}$$

$$\Delta' = \int_{\theta - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta + \frac{\Delta\theta}{2}} \Delta(\theta) d\theta$$

(5.21d)

광 강도는 이전에 단일 입사각의 빛을 받을 때와 마찬가지로 푸리에 급수 형태의 주기 함수가 되며, 푸리에 계수는 박막의 타원 파라미터에 의한 식으로 표현 된다. 단지 이전과는 다르게 박막의 타원 파라미터가 다중 입사각에 대한 적분이 포함된 식으로 표현된다는 게 약간의 차이점이다.

또한 스펙트로미터가 받는 빛의 스팟 중심 위치가 출사동에서 방위각 135° 또는 315° 위치에 있다고 가정하면 광 강도와 푸리에 계수 모델링 식은 다음과 같이 표현된다. ($\varphi = \frac{3\pi}{4}$ or $\frac{7\pi}{4}$)

$$\begin{aligned} I_{\Delta\theta\left(\frac{3\pi}{4}\text{ or } \frac{7\pi}{4}\right)} &= |E_{\text{out}} \cdot E_{\text{out}}^*| \\ &= \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |t_{\text{BS,p}}|^2 |r_{\text{BS,s}}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \right. \\ &\quad \left. \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta') \right) \left[\left\{ 1 + \right. \right. \\ &\quad \left. \frac{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') - (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')}{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')} \cos 2(\omega t - P) - \right. \\ &\quad \left. \left. 2 \tan \psi_{r,\text{BS}} \frac{\cos \Delta_{r,\text{BS}} (\tan^2 \psi' - 1) + 2 \sin \Delta_{r,\text{BS}} \tan \psi' \sin \Delta'}{\tan^2 \psi_{r,\text{BS}} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')} \sin 2(\omega t - P) \right\} \right] \end{aligned}$$

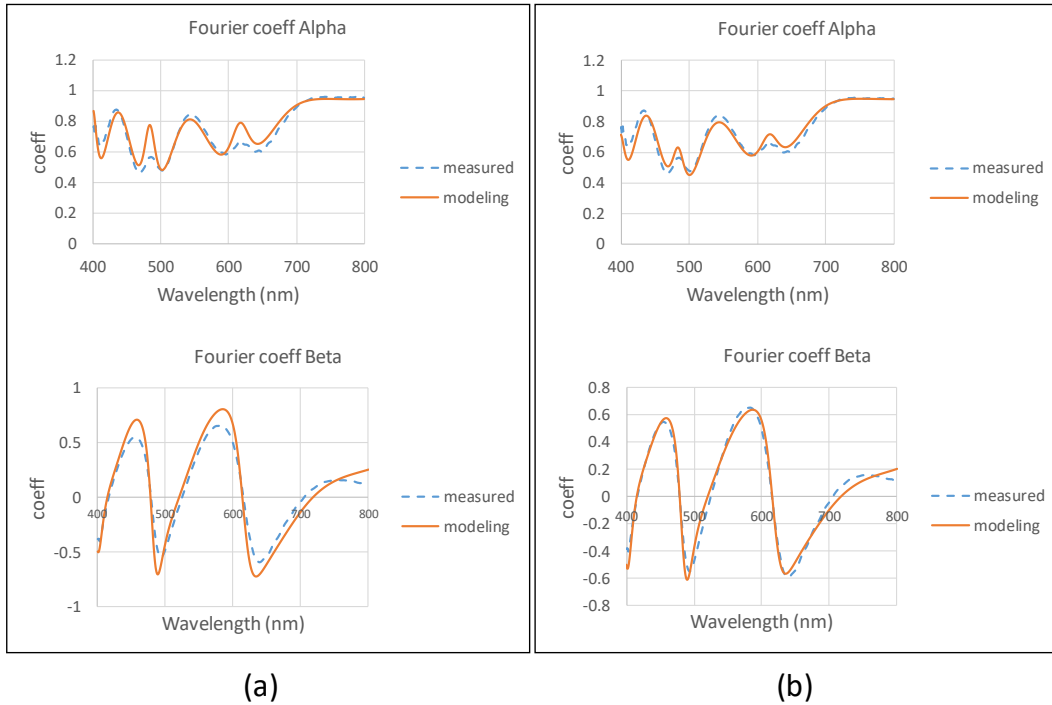
$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |t_{BS,p}|^2 |r_{BS,s}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \right. \\
&\left. \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta') \right) [\{ 1 + \alpha_{\Delta\theta} \cos 2(\omega t - P) + \beta_{\Delta\theta} \sin 2(\omega t - P) \}] \\
&\hspace{25em} (5.22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\alpha_{\Delta\theta} \left(\varphi = \frac{3\pi}{4} \text{ or } \frac{7\pi}{4} \right) \\
&= \frac{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') - (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')} \\
&\hspace{25em} (5.22a)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\beta_{\Delta\theta} \left(\varphi = \frac{3\pi}{4} \text{ or } \frac{7\pi}{4} \right) \\
&= \frac{-2 \tan \psi_{r,BS} \{ \cos \Delta_{r,BS} (\tan^2 \psi' - 1) + 2 \sin \Delta_{r,BS} \tan \psi' \sin \Delta' \}}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \tan^2 \psi' - 2 \tan \psi' \cos \Delta') + (1 + \tan^2 \psi' + 2 \tan \psi' \cos \Delta')} \\
&\hspace{25em} (5.22b)
\end{aligned}$$

ψ' , Δ' 는 (식 5.21c), (식 5.21d)와 같으며, 스팟 위치가 방위각 45° 또는 225° 에 있을 때와 비교해서 단일 입사각일 때(식 5.12, 5.14)와 마찬가지로 β 의 부호만 바뀔 뿐 거의 똑같이 표현된다. <그림 5. 8>에서 가져온 빔 스플리터의 타원 파라미터 물성치를 보정한 그래프와 빔 스플리터의 물성치 보정뿐 아니라 (식 5.21, 5.22)을 사용하여 스펙트로미터

스팟 영역에 따른 다중 입사각 적분 보정까지 행한 그래프를 비교하면 다음과 같다.



<그림 5. 17 스펙트로미터 스팟 영역에 의한 다중 입사각 보정 효과>

(a) 빔 스플리터 물성치 보정만 했을 경우

(b) 빔 스플리터 물성치 보정과 스펙트로미터 스팟 영역에 의한 다중 입사각 보정을 둘다 했을 경우

개형이 서로 거의 일치 하는 것으로 보아, 이제는 마이크로 분광 타원계를 이용해 두께와 광학 상수를 측정할 수 있을 정도로 모델링 식이 정확하게 완성 됐다고 볼 수 있다.

제 6 장 피팅 알고리즘 구현

6.1. 광학 상수 모델링 식

박막의 광학 상수(굴절률 n , 소광률 k)는(식 2.3) 파장에 따라 독립적인 값이 아니라 파장을 변수로 가지는 모델링 식에 의해 표현 될 수 있다. 이는 광학 상수를 측정 하는 데에 기준 식으로 쓰이게 된다. 이번 연구에서 사용된 모델링 식은 Cauchy, Tauc-Lorentz 이렇게 두 종류 이며 각각의 식에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

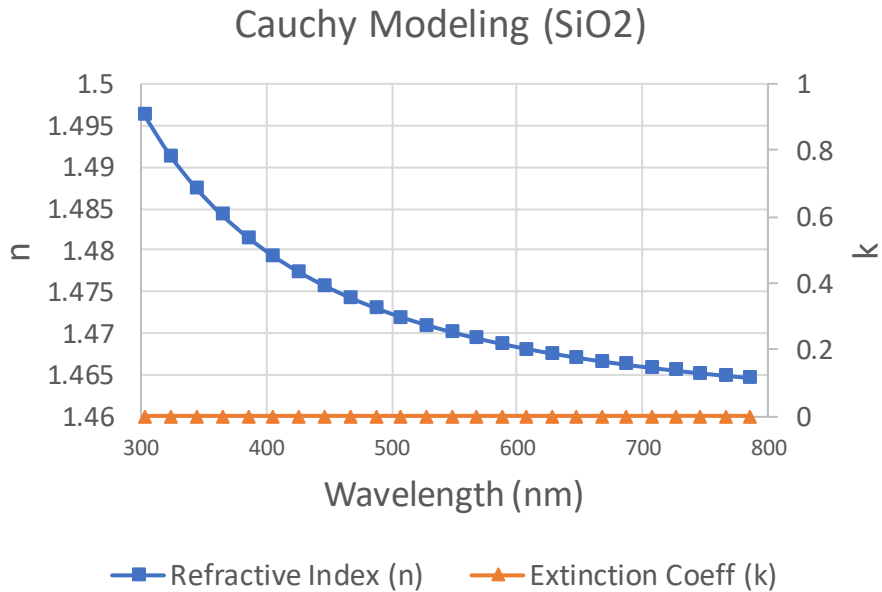
6.1.1. Cauchy

주로 투명 박막의 광학 상수를 표현 하는 데에 사용 되며 결과 적으로 소광률이 0 이 되는 경우가 많다. 광학 상수를 표현 할 수 있는 가장 간단한 모델링 식이며 수식은 다음과 같다.

$$n(\lambda) = n_0 + \frac{n_1}{\lambda^2} + \frac{n_2}{\lambda^4}$$
(6.1a)

$$k(\lambda) = k_0 + \frac{k_1}{\lambda^2} + \frac{k_2}{\lambda^4}$$
(6.1b)

광학 상수를 모델링 하기 위해 총 6 개의 변수($n_0, n_1, n_2, k_0, k_1, k_2$)가 존재 하며 굴절률과 소광률이 독립적으로 표현 된다는 특징이 있다. 단순한 4 차 식으로만 표현 되어 감소 또는 증가만 되는 개형만 표현 할 수 있다는 단점이 있어서 투명 박막이라 하더라도, 일반적으로 변곡점이 생기는 UV(Ultra-Violet) 이하 파장 영역의 광학 상수를 표현 하는 게 불가능 하다.



<그림 6. 1 일반적인 Cauchy 모델링 개형>

6.1.2. Tauc-Lorentz

투명 박막 뿐만 아니라 불투명 박막의 광학 상수를 표현 하는 데에도 사용된다. Tauc-Lorentz 모델에서 광학 상수는 다음과 같은 비선형 수식으로 표현 된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

(6.2)

$$\varepsilon_2 = \begin{cases} \frac{1}{E} \cdot \frac{AE_0C(E - E_g)^2}{(E^2 - E_0^2)^2 + C^2E^2} & (E > E_g) \\ 0 & (E \leq E_g) \end{cases}$$

(6.2a)

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\infty + \frac{2}{\pi} P \int_{E_g}^{\infty} \frac{\xi \varepsilon_2(\xi)}{\xi^2 - E^2} d\xi$$

(6.2b)

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

(6.2c)

ε 는 물질의 상대 유전률을 의미하고 E 는 빛의 에너지이다. h 는 플랑크 상수 ($4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$), c 는 빛의 속도 ($3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$), λ 는 빛의 파장을 의미하며, 나머지는 모델링을 위한 변수들이다. 그리고 상대 유전률과 (식 2.3)의 복소 굴절률은 다음과 같은 관계가 있다.

$$N = n + ik = \sqrt{\varepsilon}$$

(6.3)

결과 적으로 물질의 굴절률 및 소광률은 다음과 같이 표현된다.

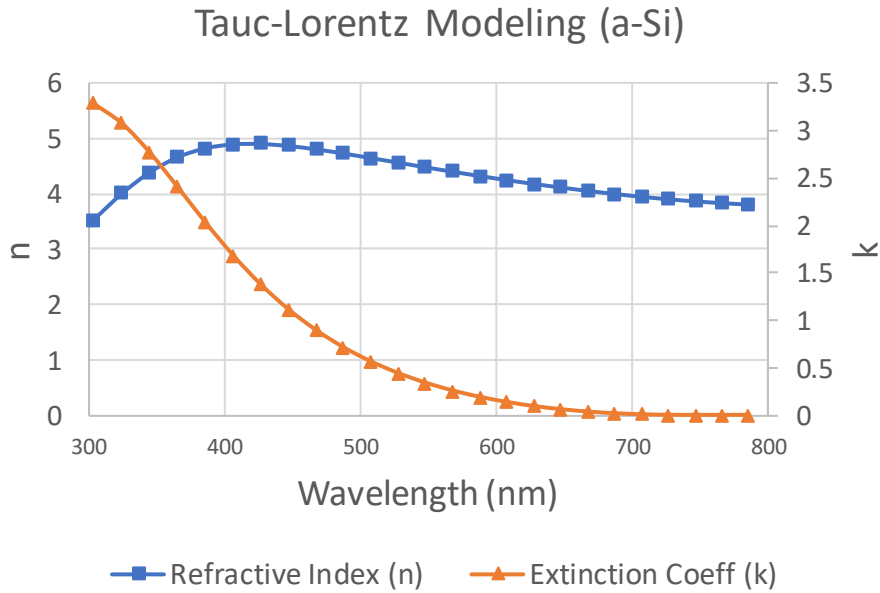
$$n = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1 \right)}$$

(6.4a)

$$k = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1 \right)}$$

(6.4b)

광학 상수를 모델링 하기 위한 총 5 개의 변수($E_g, \varepsilon_\infty, A, E_0, C$)가 존재 하며 굴절률과 소광률이 종속적으로 표현 된다는 특징이 있다. 그리고 변곡점을 온전히 표현 할 수 있어 일반적으로 변곡점이 발생하는 UV 이하 파장 영역의 광학 상수의 표현도 가능하다.

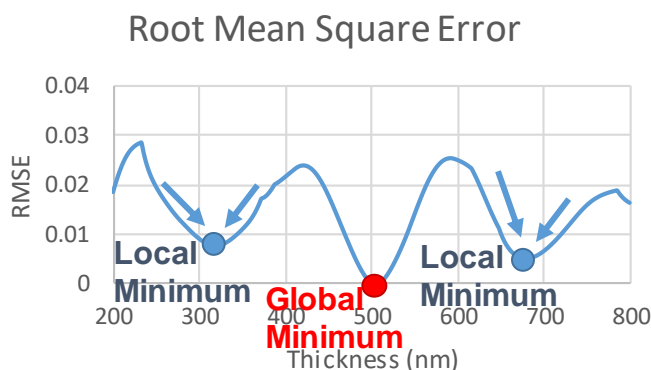


<그림 6. 2 일반적인 Tauc Lorentz 모델링 개형>

6.2. 두께, 광학 상수 동시 피팅 알고리즘

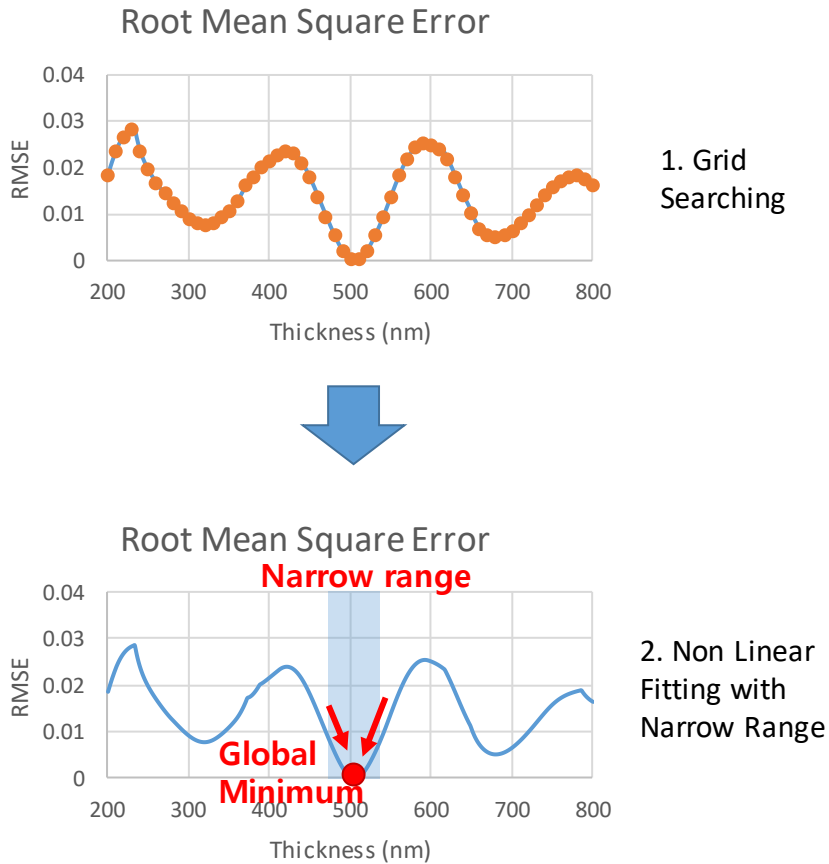
이번에 제작된 마이크로 분광 타원계에서는 푸리에 계수를 측정한 값과 앞 장에서 제시한 식에 의한 모델링 신호를 비교해 가장 개형이 잘 들어맞는 조건을 찾고, 그때의 조건 변수를 측정 결과 값으로 산출 하게 된다. 보통 두께와 광학 상수를 동시에 측정 하게 되면 굴절률, 소광률 모델링 식의 종류에 따라 총 6~7 개의 피팅 변수를 가지게 된다. 측정의 정확도를 높이려면 피팅 하는 데이터의 개수가 많을수록 유리하기 때문에 다파장 광원을 사용하게 되면 단파장 광원을 사용하는 것보다 데이터 개수가 파장의 개수만큼 배로 늘어 나게 되고, 광학 상수 측정에 유리해진다.

피팅 알고리즘으로는 Levenberg-Marquardt 비선형 피팅 알고리즘을 사용하는데 탐색 가능 범위가 넓지 않은 비선형 피팅의 특성 상, 그것 만으로 넓은 변수 범위를 탐색 한다면 <그림 6. 3>과 같이 전역 최소값(Global minimum)을 찾지 못하고 극솟값(Local minimum)에 빠지기 쉽다. 그래서 넓은 범위를 비선형 피팅 만으로 한번에 찾는 게 힘들며, 변수가 많아지는 경우에도 측정을 정확히 할 수 없다. 그래서 추가 적인 과정이 필요하게 된다.



<그림 6. 3 비선형 피팅만 사용했을 경우의 극솟값 수렴>

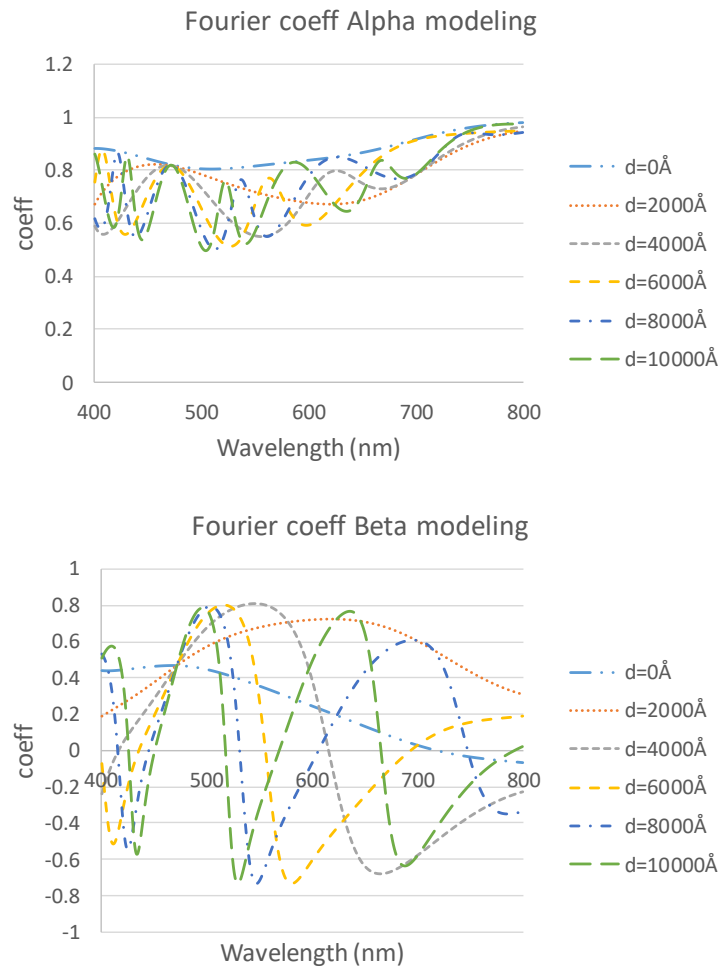
보통 넓은 탐색 범위에서는 비선형 피팅을 하기에 앞서, 비교적 큰 간격으로 변수를 직접 바꿔 주면서 반복 구문으로 측정 신호와 모델링 신호의 RMSE 를 직접 산출 해 가며 대략적인 최적 값을 찾는 과정을 거치게 되는데 이를 그리드 탐색이라고 한다. 이런 그리드 탐색을 통해 탐색 범위를 좁혀 준 다음 비선형 피팅을 실시하면 정확한 전역 최소값을 구할 수 있다(<그림 6. 4>).



<그림 6. 4 그리드 탐색과 비선형 피팅의 조합을 통한 정확도 향상>

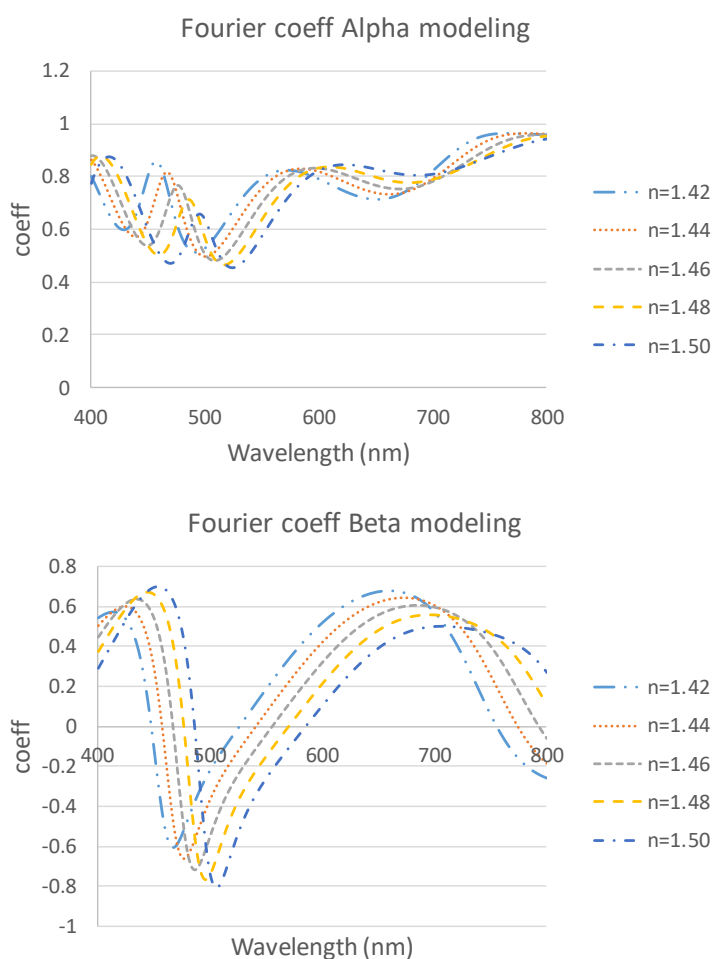
두께와 광학 상수를 동시에 측정 할 때도 정확한 값을 찾기 위해서는 이 그리드 탐색을 활용해야 한다. 하지만 변수가 많기 때문에 탐색 하는 변수 종류의 우선 순위를 잘 선택 하는 것이 중요하다. 우선 순위를 선정하는 과정에 있어서, 이번에 구성한 광학계에서의 각 변수 변화에 따른 푸리에 계수 신호 변화를 시뮬레이션으로 살펴 보았다.

일단 두께의 경우 보통 탐색 범위가 수십 Å 에서 수만 Å 까지 다양할 수 있다. Si기판 위에 SiO₂가 쌓여 있는 박막에서 두께를 0Å 부터 10000Å 까지 2000Å간격으로 모델링 했을 경우 푸리에 계수의 신호 변화를 시뮬레이션 한 결과는 다음과 같다. 여기서 스펙트로미터 스팟 위치는 출사동 상의 방위각이 135° , 빛의 입사각이 61° (반지름 1.7mm)가 되는 위치에 뒀다고 가정했다.



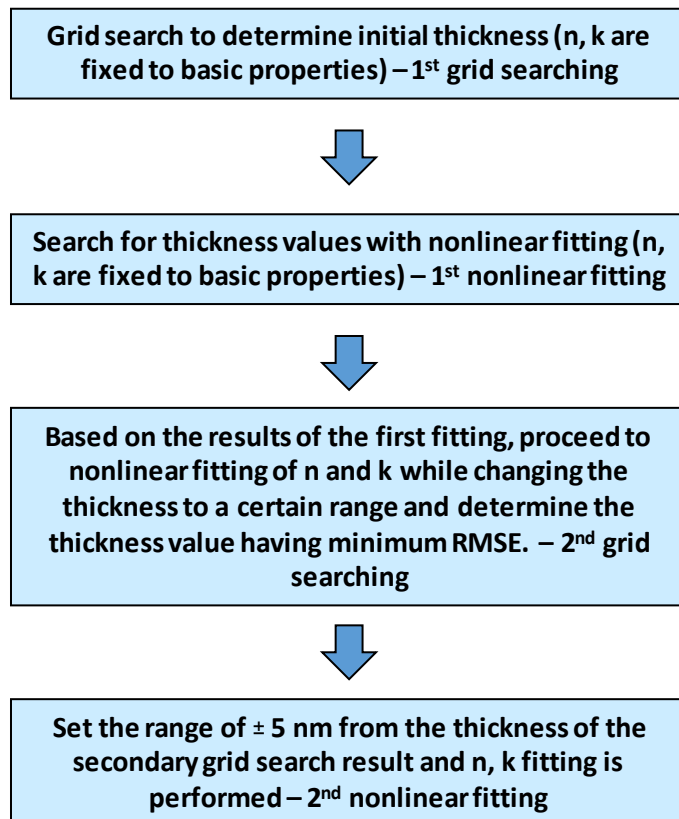
<그림 6. 5 SiO₂ 박막 두께 변화에 따른 푸리에 계수 개형 변화>

반면 굴절률의 경우 보통 같은 물질 상에서는 최대 0.1 정도 폭으로만 변화 하며 탐색 폭도 0.1 정도면 된다. 위와 같은 조건에서 SiO_2 두께를 5000\AA 로 고정하고 일반적인 SiO_2 물질의 굴절률 변동폭인 1.4 ~ 1.5 사이를 0.2 간격으로 변화 시켜 가며 푸리에 계수의 신호 변화를 시뮬레이션 한 결과는 다음과 같다.



<그림 6. 6 SiO_2 박막 굴절률 변화에 따른 푸리에 계수 개형 변화>

<그림 6. 5>과 <그림 6. 6>를 비교해 보면 두께와 굴절률 모두 일반적인 탐색 범위를 기준으로 했을 때, 두께가 굴절률보다 푸리에 계수의 개형 변화에 영향을 더 크게 미치는 것을 볼 수 있다. 그래서 굴절률 보다는 두께 값을 먼저 탐색 하고 값을 우선적으로 결정하는 것이 바람직하다. 그래서 그리드 탐색과 비선형 피팅을 모두 활용하면서 두께를 굴절률, 소광률보다 우선적으로 탐색 하는 피팅 알고리즘을 다음 그림과 같이 고안해 냈다.



<그림 6. 7 두께, 광학 상수 동시 피팅 알고리즘>

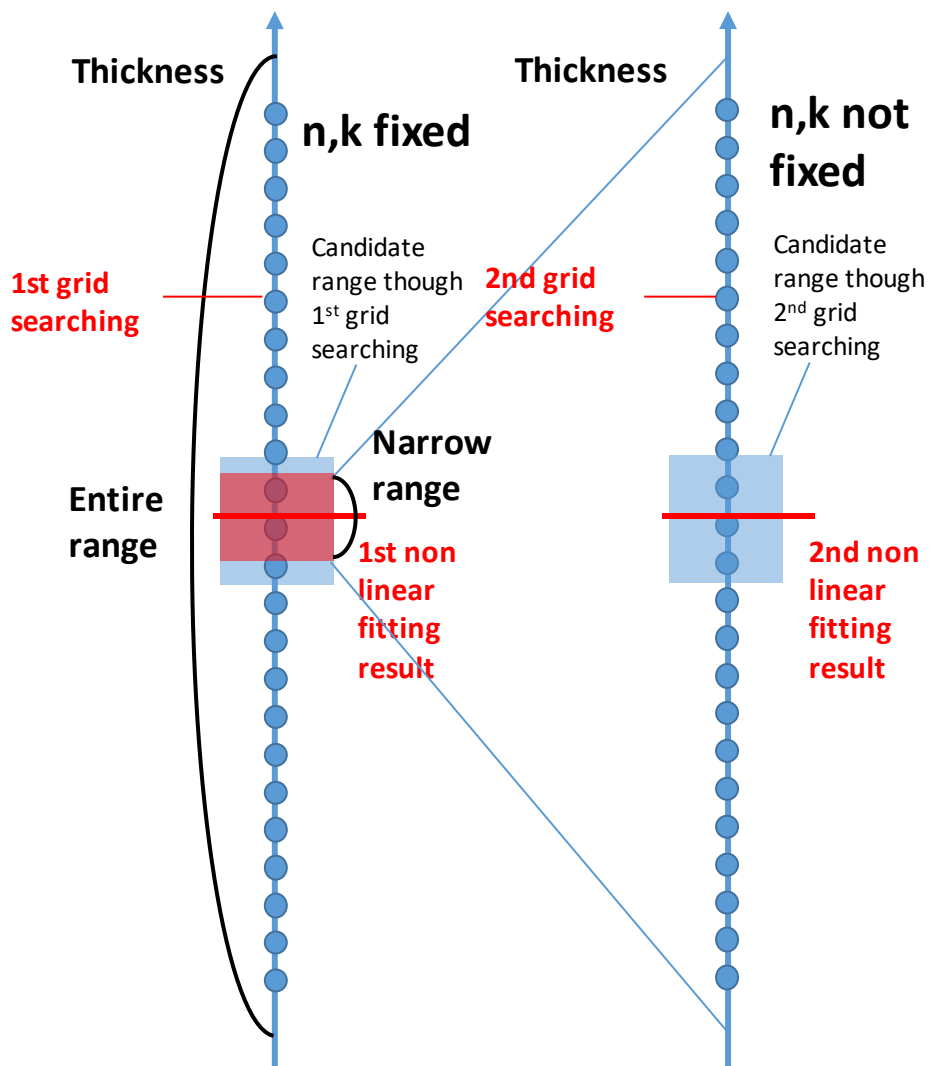
우선 첫 번째 단계는 굴절률, 소광률을 박막을 구성하는 물질의 일반적인 물성치로 고정시키고 그리드 탐색을 통해 두께의 대략적인 최적 값을 우선 탐색 한다. 이 때 탐색 범위는 두께가 변할 수 있는 총 범위를 뒤서 넓은 범위를 탐색 하게 된다. 이를 첫 번째 그리드 탐색 과정(First grid searching)이라고 한다.

그런 다음 첫 번째 탐색 결과 값을 기준으로 두께 탐색 범위를 줄여 준 다음 역시나 굴절률, 소광률은 고정 시킨 상태로 Levenberg-Marquardt 비선형 피팅을 실시하여 좀 더 구체적인 최적 두께 값을 결정한다. 이를 첫 번째 비선형 피팅 과정(First nonlinear fitting)이라고 한다.

두 번의 과정을 통해 두께의 대략 적인 참 값을 유추해 낼 수 있다. 그런 다음 그 값을 기준으로 두고 두께 범위를 좁게 설정해서 그 안에서 다시 두께를 그리드 탐색 하되, 이번에는 두께 변화에 따라 두께, 굴절률, 소광률을 동시에 비선형 피팅 하면서 측정 값과 모델링 값 사이의 일치율이 제일 높은 조건의 두께 값을 찾는다. 이를 두 번째 그리드 탐색 과정(Second grid searching)이라고 한다.

이렇게 정해진 두께 값에서 마지막으로 두께 범위는 미세할 정도로 좁히고 굴절률, 소광률을 동시에 비선형 피팅 해서 최종 적인 결과 값들을 산출해 낸다. 이를 두 번째 비선형 피팅 과정(Second nonlinear fitting)이라고 한다.

이렇게 4 단계의 과정을 거치고 나면 두께, 굴절률, 소광률을 모두 반영하여 가장 높은 일치율을 보이는 조건을 찾을 수 있으며 정확한 값을 측정 할 수 있다. 이러한 피팅 알고리즘의 전반적인 개요도를 <그림 6. 8>에 나타냈다.



<그림 6. 8 완성된 피팅 알고리즘 개요도>

제 7 장 두께 및 광학 상수 측정 테스트

7.1. 개요

앞에서 제작한 분광 마이크로 타원계(제 4 장) 및 신호 해석 방법(제 5 장), 그리고 피팅 알고리즘(제 6 장)을 이용하여 산업에서 실제로 제작되는 여러 박막 샘플의 측정 테스트를 실시 했다. 측정 값의 객관 적인 검증을 위해 박막 측정에서 레퍼런스 장비로 많이 사용되는 Horiba 사의 고성능 분광 타원계(Uvisel)와 결과를 비교함으로써 측정 값을 검증 하였다. 레퍼런스로 사용한 고성능 분광 타원계의 사양은 다음과 같다.

<표 7. 1 Horiba 고성능 분광 타원계 사양>

Horiba Uvisel	
Type	Spectroscopic Phase Modulated Ellipsometer
Repeatability	$3\sigma < 1.0\text{\AA}$ (Standard Sample)
Thickness Range	1 Å - 10 μm
Spot Size	2 x 1 mm
Spectral Range	250-880 nm
Light Source	Xenon Lamp 150W

이번에 측정 한 샘플들 중에는 인증된 값이 존재하는 표준 시편을 사용한 경우도 있었지만 인증된 값이 나온 측정 위치가 명확하지 않았고, 시간이 지남에 따른 특성 변질 가능성도 존재 하기 때문에 레퍼런스 장비를 이용한 측정 값을 기준으로 삼게 되었다. 각 샘플의 두께 측정 값 및 광학

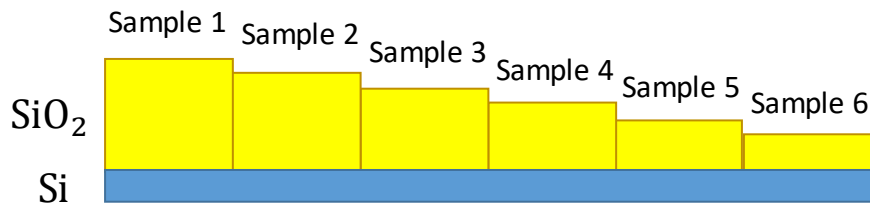
상수 측정 값의 정확도를 비교하고 반복 측정의 성능 또한 검증 하였다. 광학계의 정렬 조건과 관련해서는, 스펙트로미터 스팟의 중심을 출사동 상에 방위각이 135° , 빛의 입사각이 61° (반지름 1.7mm)가 되는 위치에 놓고 측정을 실시했다.

7.2. SiO_2 on Si 웨이퍼 샘플

Mikropac 社에서 제작한 샘플이며 Si 웨이퍼 위에 SiO_2 박막이 쌓여 되어 있다. 샘플은 다음과 같은 외형과 단면을 가지고 있다.



<그림 7. 1 Mikropac SiO_2 샘플>



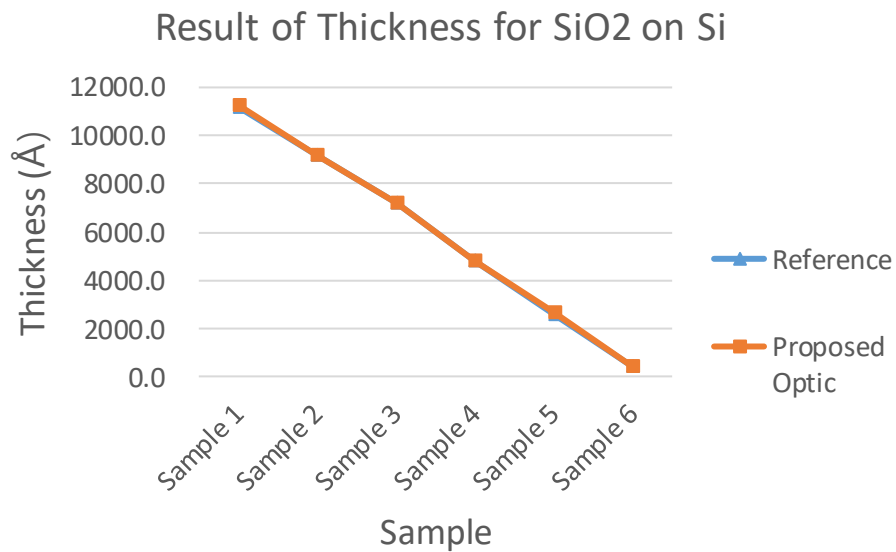
<그림 7. 2 Mikropac SiO₂ 샘플의 단면>

그림에서 볼 수 있듯이 총 6 단계의 두께를 가지고 있으며 Sample 1 에서 Sample 6 으로 갈수록 두께가 점차 얇아 지는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 0~11000Å 의 범위를 가지는 SiO₂ 의 두께를 측정 했다. SiO₂가 투명 박막 이기 때문에 광학 상수의 모델링 식은 Cauchy 식을 사용하였다.

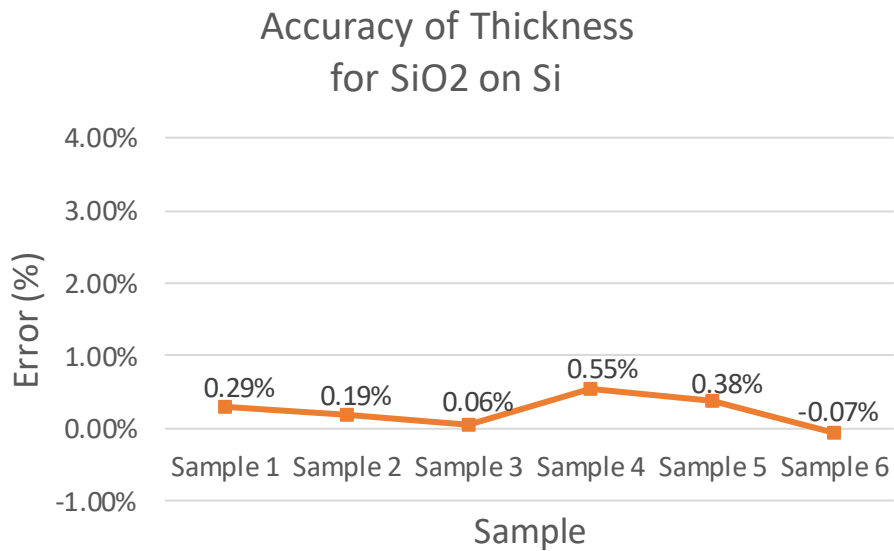
다음은 해당 샘플의 두께를 측정한 결과이다. 제안된 광학계로 측정된 데이터의 경우 20 회 반복 측정해서 평균값을 결과로 표시했다.

<표 7. 2 SiO₂ 샘플 두께 측정 결과>

Thickness (Å)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Reference	11188.4	9214.0	7238.1	4792.8	2630.2	470.7
Proposed Optic	11221.0	9231.4	7242.5	4819.2	2640.3	470.4
Accuracy	0.29%	0.19%	0.06%	0.55%	0.38%	-0.07%



<그림 7. 3 SiO₂ 샘플 두께 측정 결과 그래프>



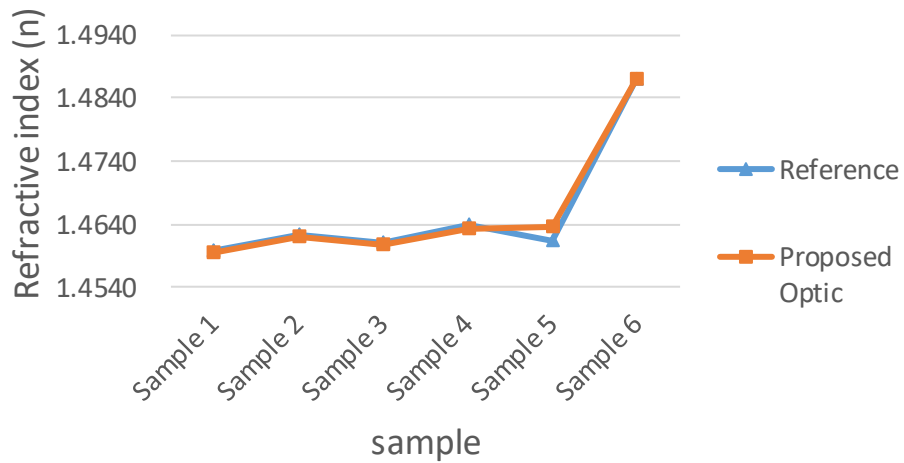
<그림 7. 4 SiO₂ 샘플 두께 측정 정확도 그래프>

그리고 다음은 두께와 동시에 측정된 굴절률 측정 결과이다.

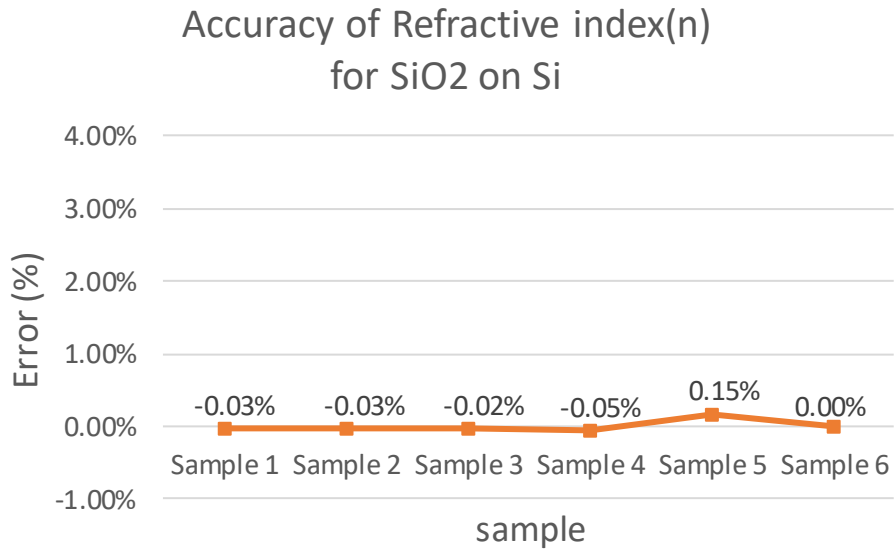
<표 7. 3 SiO₂ 샘플 굴절률 측정 결과>

n (at $\lambda=635\text{nm}$)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Reference	1.4598	1.4624	1.4609	1.4639	1.4615	1.4869
Proposed Optic	1.4594	1.4620	1.4606	1.4632	1.4637	1.4870
Accuracy	-0.03%	-0.03%	-0.02%	-0.05%	0.15%	0.00%

Result of Refractive index(n) for SiO₂ on Si



<그림 7. 5 SiO₂ 샘플 굴절률 측정 결과 그래프>



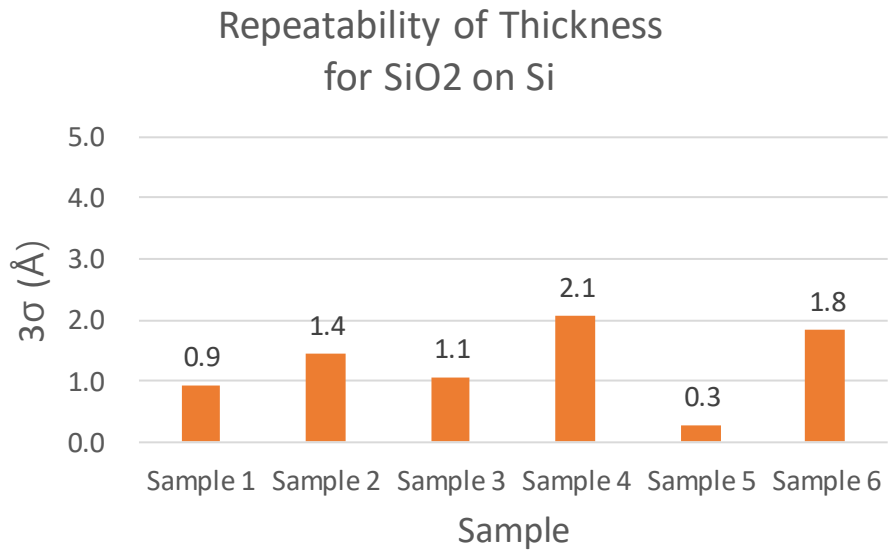
<그림 7. 6 SiO₂ 샘플 굴절률 측정 정확도 그래프>

SiO₂ 의 경우 기본적으로 투명 박막이기 때문에 소광률은 0 이 된다.
그래서 앞으로 투명 박막의 경우 소광률 측정 결과는 생략 하겠다.

다음은 SiO₂ 두께를 제안된 광학계로 측정했을 때 3 σ 반복도 결과이다.

<표 7. 4 SiO₂ 샘플 두께 측정 반복도>

Thickness (Å)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
3 σ	0.9	1.4	1.1	2.1	0.3	1.8

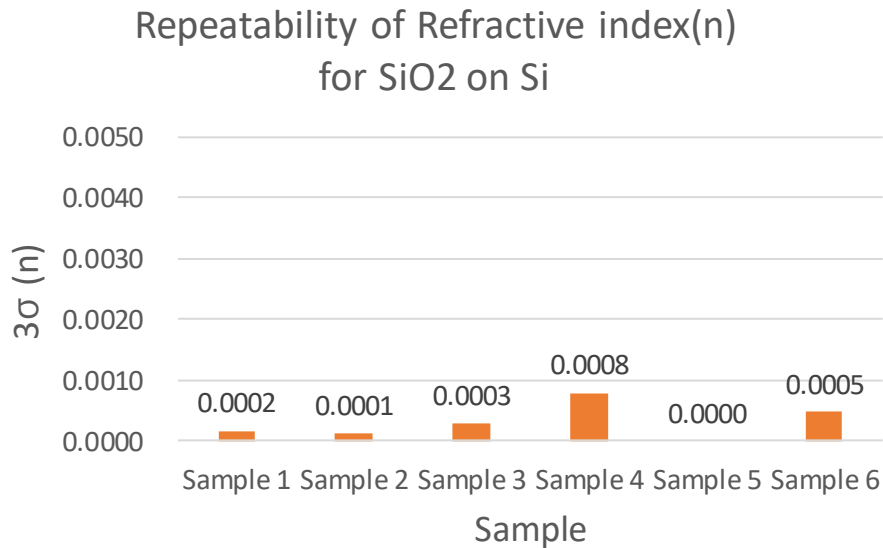


<그림 7. 7 SiO₂ 샘플 두께 측정 반복도 그래프>

다음은 SiO₂ 굴절률을 제안된 광학계로 측정했을 때 3σ 반복도 결과이다.

<표 7. 5 SiO₂ 샘플 굴절률 측정 반복도>

n (at λ=635nm)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
3σ	0.0002	0.0001	0.0003	0.0008	0.0000	0.0005



<그림 7. 8 SiO₂ 샘플 굴절률 측정 반복도 그래프>

Si 웨이퍼 위에 SiO₂ 이 쌓여있는 박막 샘플 측정을 종합한 결과 두께 측정의 경우 정확도 0.55% 이내, 3σ 반복도 2.1Å 이내의 결과를 보였으며, 굴절률 측정의 경우 정확도 0.15% 이내, 3σ 반복도 0.0008 이내의 측정 성능 결과가 나왔다.

7.3. SiN_x on Glass 샘플

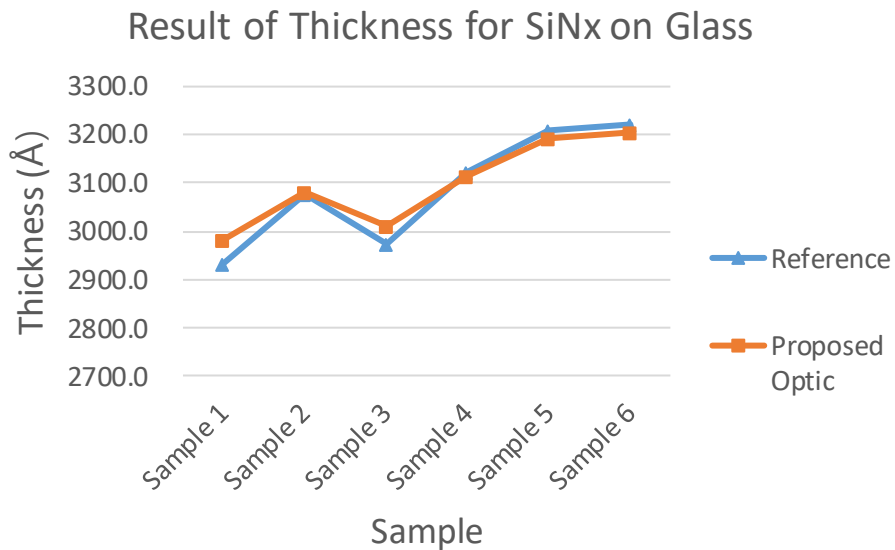
글라스 위에 CVD 공정으로 SiN_x 가 증착 되어 있는 샘플이며 총 여섯 개의 샘플을 측정 하였다. 각각의 샘플은 증착 당시의 챔버의 온도 및 증착 속도가 차이 나므로 각기 다른 두께와 광학 상수를 가진다. SiN_x 의 경우 절연체의 역할을 하는데 광학 상수에 따라 절연 성능이 달라지므로 정확한

값을 아는 것이 중요하다. SiN_x 도 SiO_2 와 마찬가지로 투명 박막 이기 때문에 광학 상수의 모델링 식은 Cauchy 식을 사용하였다.

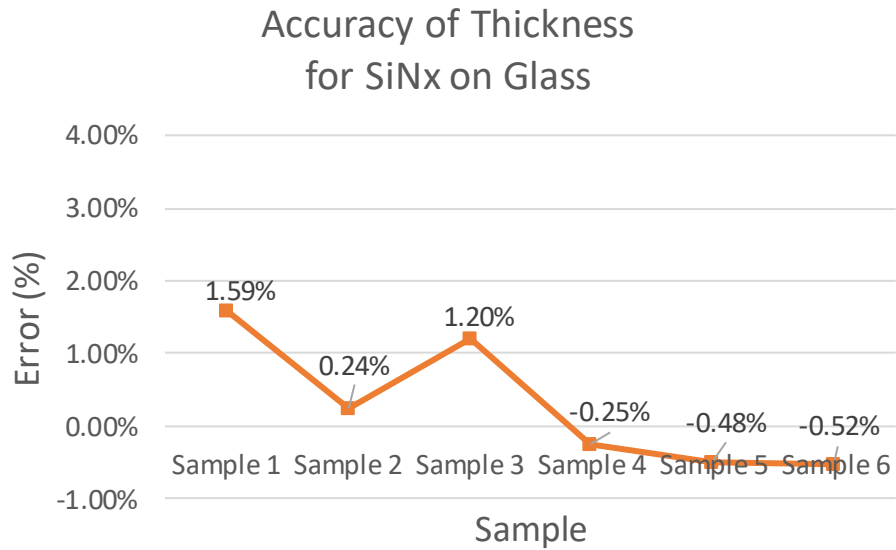
먼저 두께를 측정한 결과이다. 제안된 광학계로는 20 회 반복 측정을 실시 했으며 평균값을 결과로 표시했다.

<표 7. 6 SiN_x 샘플 두께 측정 결과>

Thickness (Å)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Reference	2933.3	3075.0	2974.4	3120.1	3207.8	3219.5
Proposed Optic	2980.0	3082.3	3010.1	3112.2	3192.3	3202.7
Accuracy	1.59%	0.24%	1.20%	-0.25%	-0.48%	-0.52%



<그림 7. 9 SiN_x 샘플 두께 측정 결과 그래프>

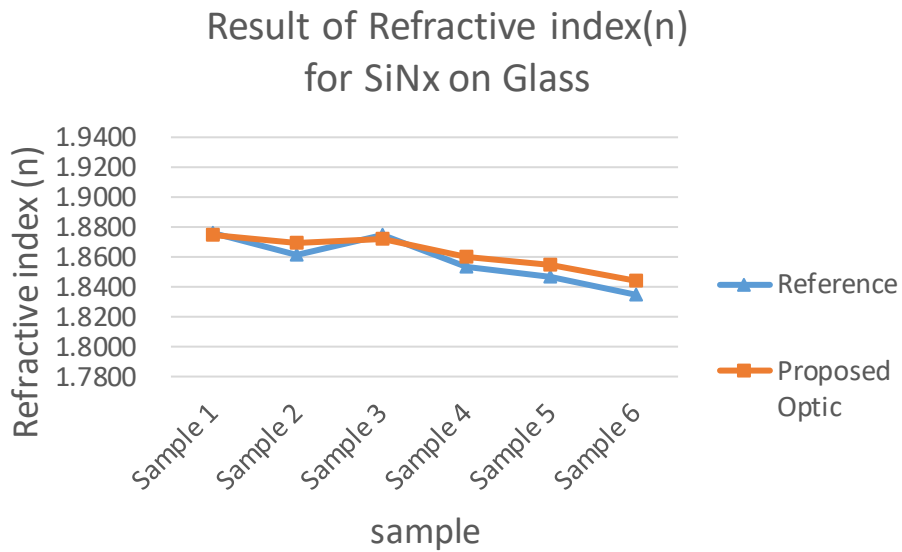


<그림 7. 10 SiNx 샘플 두께 측정 정확도 그래프>

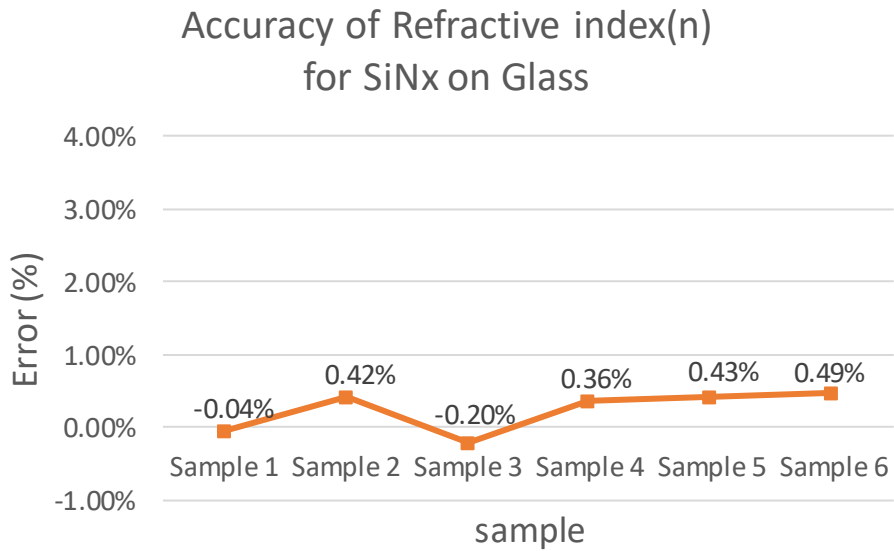
그리고 다음은 두께와 동시에 측정된 굴절률 측정 결과이다.

<표 7. 7 SiNx 샘플 굴절률 측정 결과>

n (at $\lambda=635\text{nm}$)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Reference	1.8758	1.8615	1.8753	1.8528	1.8471	1.8351
Proposed Optic	1.8751	1.8693	1.8716	1.8595	1.8550	1.8440
Accuracy	-0.04%	0.42%	-0.20%	0.36%	0.43%	0.49%



<그림 7. 11 SiNx 샘플 굴절률 측정 결과 그래프>

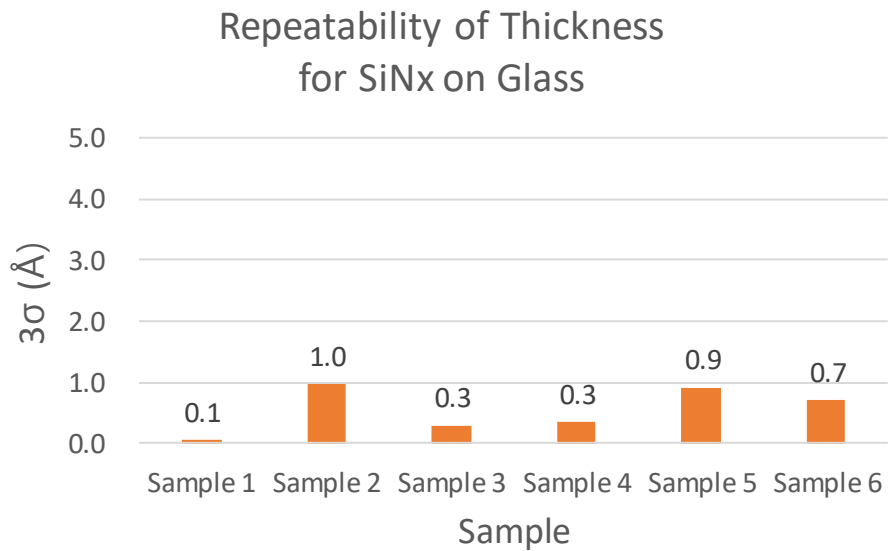


<그림 7. 12 SiNx 샘플 굴절률 측정 정확도 그래프>

다음은 SiN_x 의 두께를 제안된 광학계로 측정했을 때 3σ 반복도 결과이다.

<표 7. 8 SiN_x 샘플 두께 측정 반복도>

Thickness (Å)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
3σ	0.1	1.0	0.3	0.3	0.9	0.7



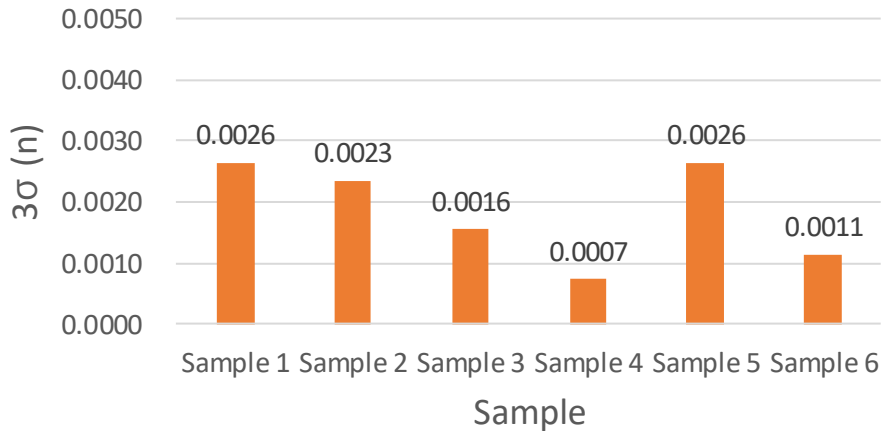
<그림 7. 13 SiN_x 샘플 두께 측정 반복도 그래프>

마지막으로 SiN_x 의 굴절률을 제안된 광학계로 측정했을 때 3σ 반복도 결과이다.

<표 7. 9 SiNx 샘플 굴절률 측정 반복도>

n (at $\lambda=635\text{nm}$)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
3σ	0.0026	0.0023	0.0016	0.0007	0.0026	0.0011

Repeatability of Refractive index(n)
for SiNx on Glass



<그림 7. 14 SiNx 샘플 굴절률 측정 반복도 그래프>

Glass/SiNx 샘플 측정을 종합한 결과 두께 측정의 경우 정확도 1.6% 이내, 3σ 반복도 1\AA 이내의 결과를 보였으며, 굴절률(n) 측정의 경우 정확도 0.5% 이내, 3σ 반복도 0.0026 이내의 측정 성능 결과가 나왔다.

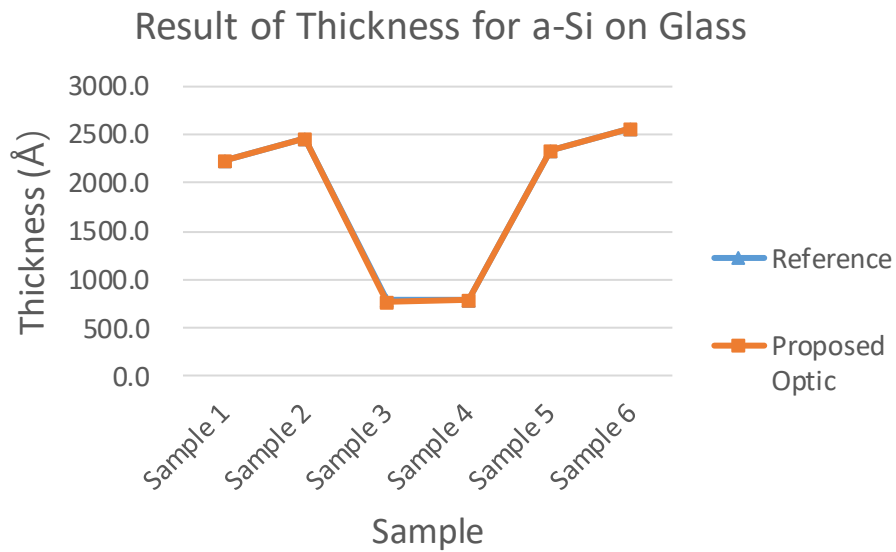
7.4. a-Si on Glass 샘플

글라스 위에 CVD 공정으로 a-Si 가 증착 되어 있는 샘플이며 총 여섯 개의 샘플을 측정 하였다. 앞의 Glass 위에 SiN_x 가 쌓여 있는 샘플과 마찬가지로 각각의 샘플은 증착 당시의 챔버의 온도 및 증착 속도가 다르므로 각기 다른 두께와 광학 상수를 가진다. a-Si의 경우 전기 전도체의 역할을 하는데 광학 상수에 따라 전기 전도 성능이 달라지므로 정확한 광학 상수 값을 아는 것이 중요하다. a-Si의 경우는 소광률이 0 이 아니기 때문에 불투명 하다고 볼 수 있으므로 광학 상수의 모델링 식으로 Cauchy 가 아닌 Tauc-Lorentz 식을 사용하였다.

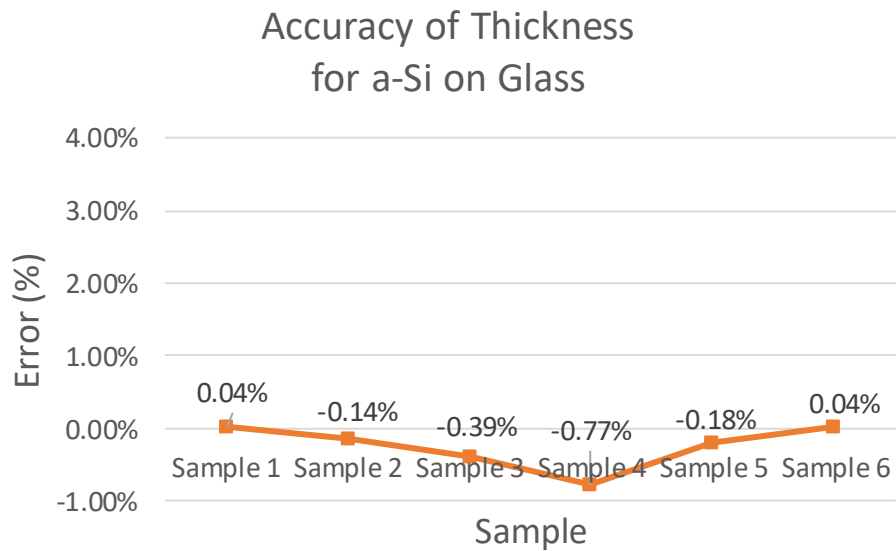
먼저 두께를 측정한 결과이다. 제안된 광학계로는 20 회 반복 측정을 실시 했으며 평균값을 결과로 표시했다.

<표 7. 10 a-Si 샘플 두께 측정 결과>

Thickness (Å)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Reference	2227.7	2462.0	781.3	791.0	2341.4	2557.8
Proposed Optic	2228.5	2458.6	778.2	784.9	2337.1	2558.8
Accuracy	0.04%	-0.14%	-0.39%	-0.77%	-0.18%	0.04%



<그림 7. 15 a-Si 샘플 두께 측정 결과 그래프>

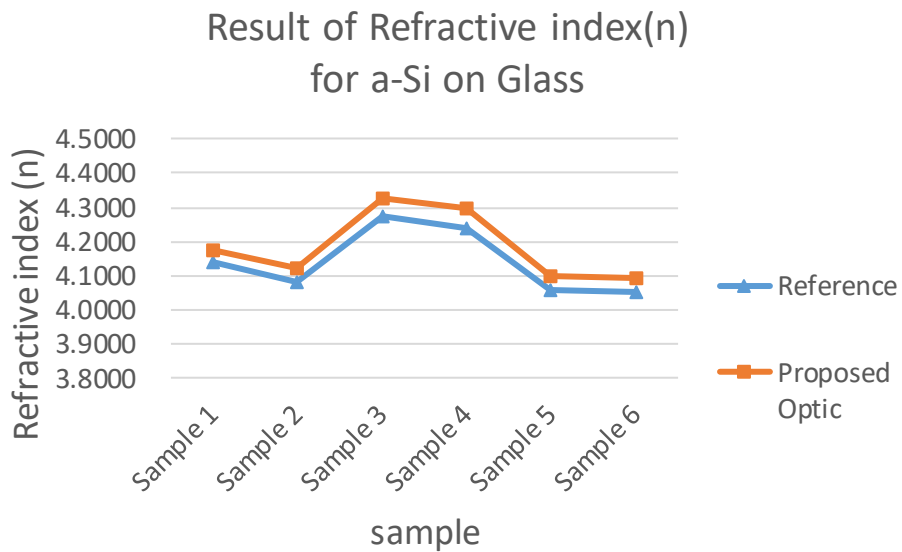


<그림 7. 16 a-Si 샘플 두께 측정 정확도 그래프>

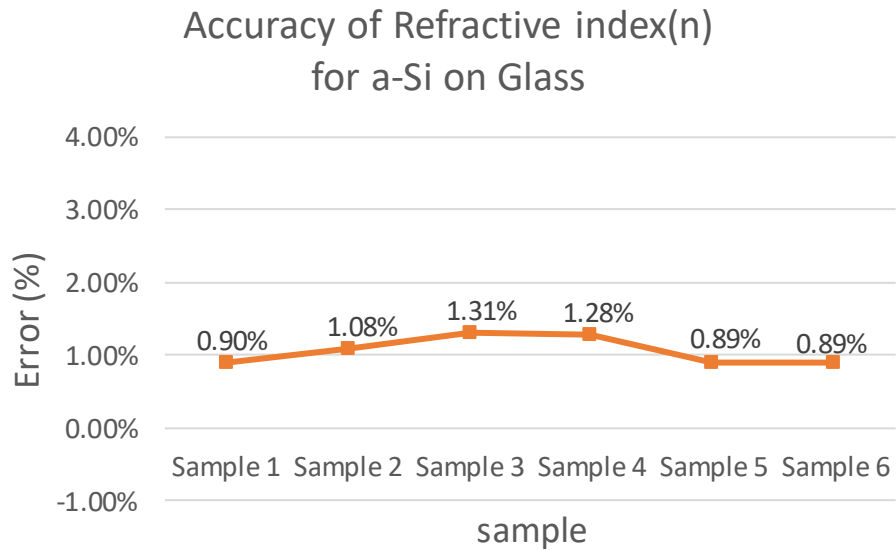
다음은 두께와 동시에 측정된 굴절률 측정 결과이다.

<표 7. 11 a-Si 샘플 굴절률 측정 결과>

n (at $\lambda=635\text{nm}$)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Reference	4.1384	4.0785	4.2712	4.2402	4.0598	4.0538
Proposed Optic	4.1755	4.1227	4.3271	4.2943	4.0958	4.0900
Accuracy	0.90%	1.08%	1.31%	1.28%	0.89%	0.89%



<그림 7. 17 a-Si 샘플 굴절률 측정 결과 그래프>

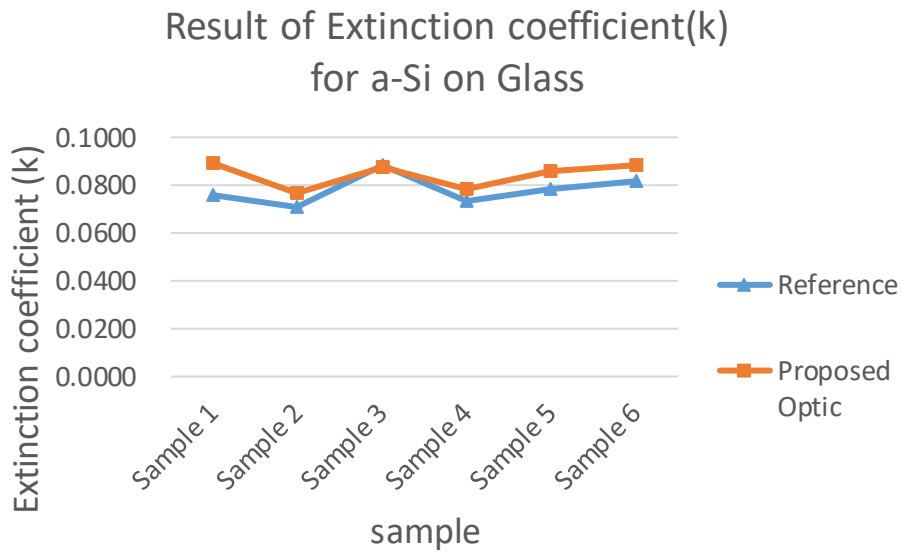


<그림 7. 18 a-Si 샘플 굴절률 측정 정확도 그래프>

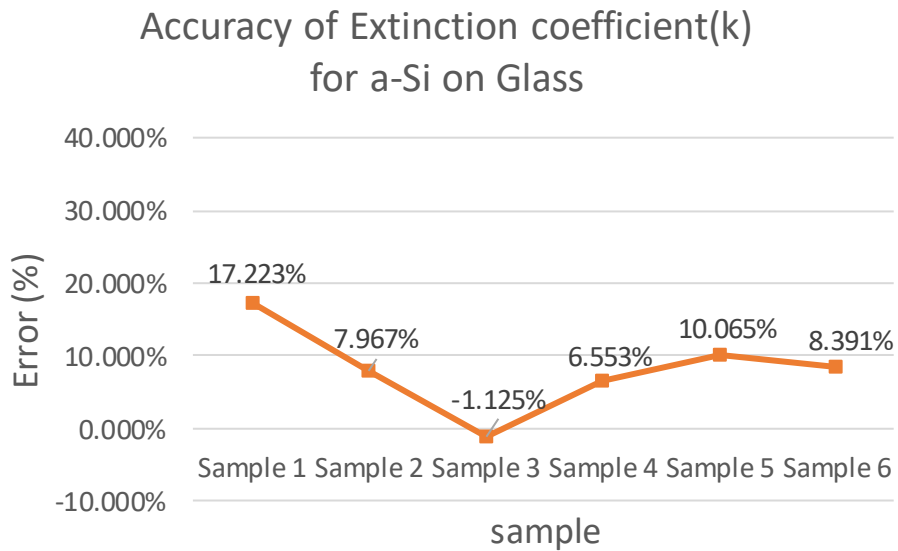
그리고 a-Si는 불투명 물질로써 소광률이 0 이 아니다. 그래서 소광률 측정 결과도 표시 했으며 그 결과는 다음과 같다.

<표 7. 12 a-Si 샘플 소광률 측정 결과>

k (at $\lambda=635\text{nm}$)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Reference	0.0761	0.0712	0.0884	0.0733	0.0784	0.0815
Proposed Optic	0.0892	0.0769	0.0874	0.0781	0.0863	0.0883
Accuracy	17.223%	7.967%	-1.125%	6.553%	10.065%	8.391%



<그림 7. 19 a-Si 샘플 소광률 측정 결과 그래프>

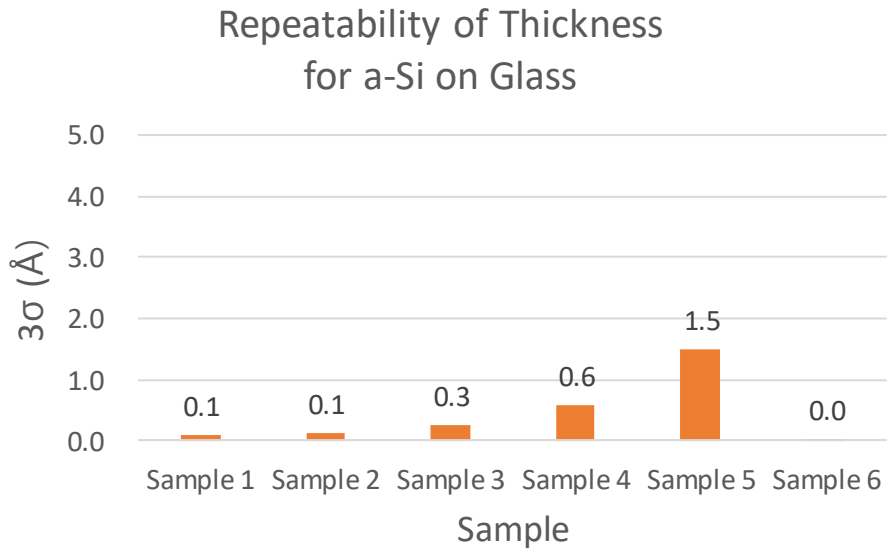


<그림 7. 20 a-Si 샘플 소광률 측정 정확도 그래프>

다음은 a-Si 의 두께를 제안된 광학계로 측정했을 때 3σ 반복도 결과이다.

<표 7. 13 a-Si 샘플 두께 측정 반복도>

Thickness (Å)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
3σ	0.1	0.1	0.3	0.6	1.5	0.0

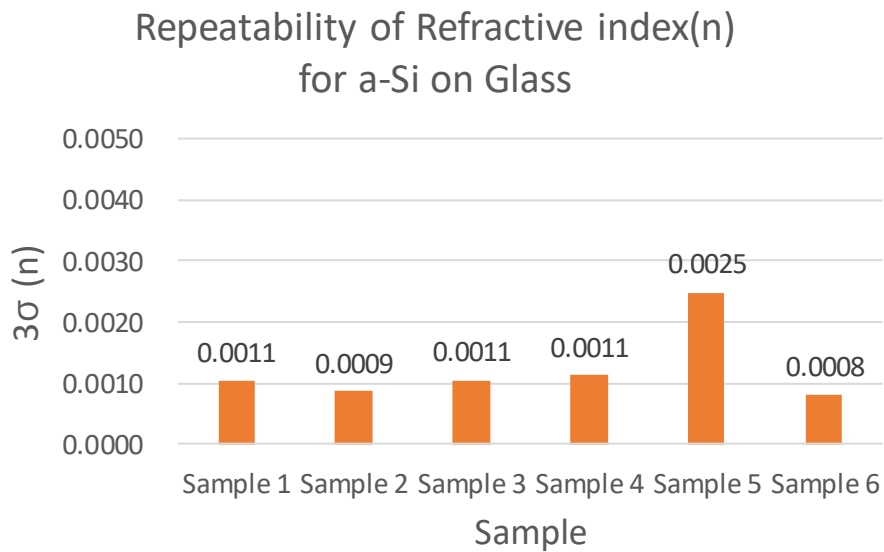


<그림 7. 21 a-Si 샘플 두께 측정 반복도 그래프>

그 다음은 a-Si 의 굴절률을 제안된 광학계로 측정했을 때 3σ 반복도 결과이다.

<표 7. 14 a-Si 샘플 굴절률 측정 반복도>

n (at $\lambda=635\text{nm}$)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
3σ	0.0011	0.0009	0.0011	0.0011	0.0025	0.0008

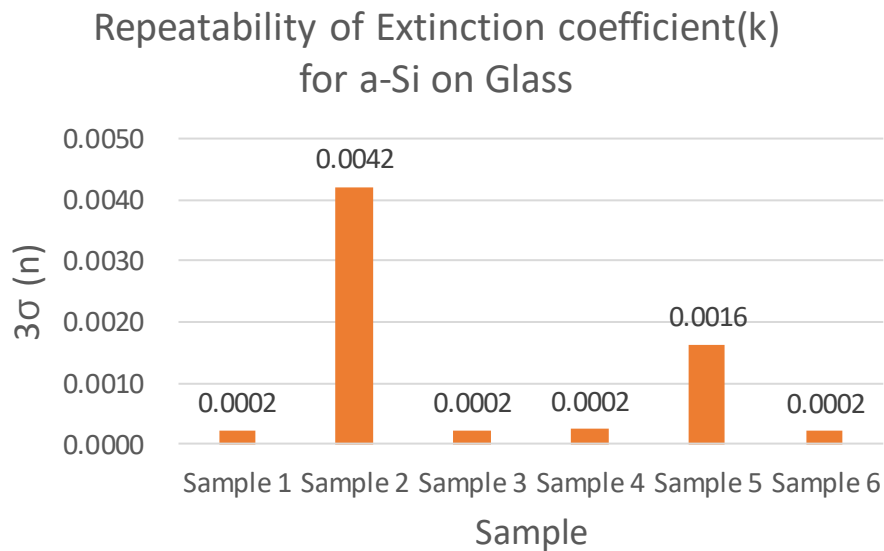


<그림 7. 22 a-Si 샘플 굴절률 측정 반복도 그래프>

마지막으로 a-Si의 소광률을 제안된 광학계로 측정했을 때 3σ 반복도 결과이다.

<표 7. 15 a-Si 샘플 소광률 측정 반복도>

k (at $\lambda=635\text{nm}$)	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
3σ	0.0002	0.0042	0.0002	0.0002	0.0016	0.0002



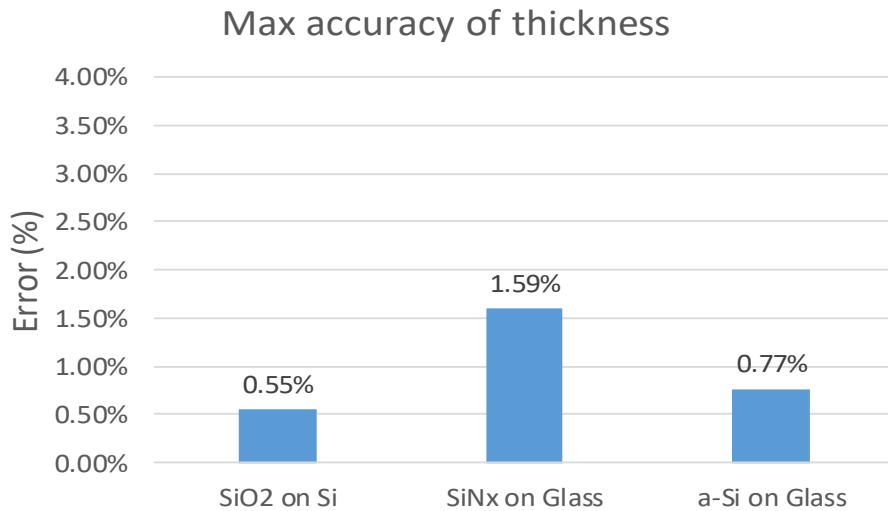
<그림 7. 23 a-Si 샘플 소광률 측정 반복도 그래프>

Glass/a – si 샘플 측정을 종합한 결과 두께 측정의 경우 정확도 0.8% 이내, 3σ 반복도 1.5\AA 이내의 결과를 보였으며, 굴절률 측정의 경우 정확도 1.4% 이내, 3σ 반복도 0.0025 이내의 결과를 보였다. 마지막으로 소광률 측정의 경우 정확도 17.5% 이내, 3σ 반복도 0.0042 이내의 측정 성능 결과가 나왔다. 앞에서의 투명 박막 보다는 광학 상수의 측정 성능은 낮으며

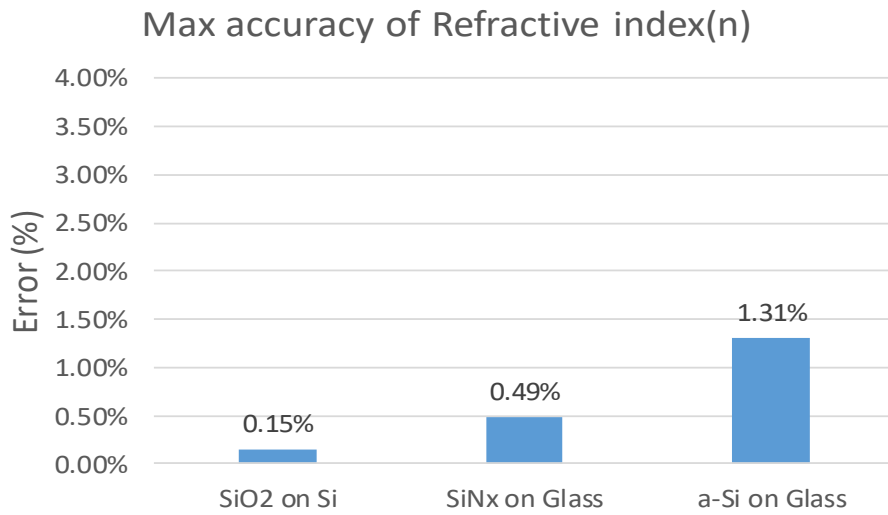
소광률의 경우 나머지 측정 값들에 비해 상대적으로 낮은 절대값에 의해 정확도가 나쁘게 나왔다.

7.5. 정리

모든 샘플에 대한 측정 테스트 결과를 정리해 보았다. 우선 각 샘플에 대한 두께와 굴절률의 최대 정확도는 다음과 같다.

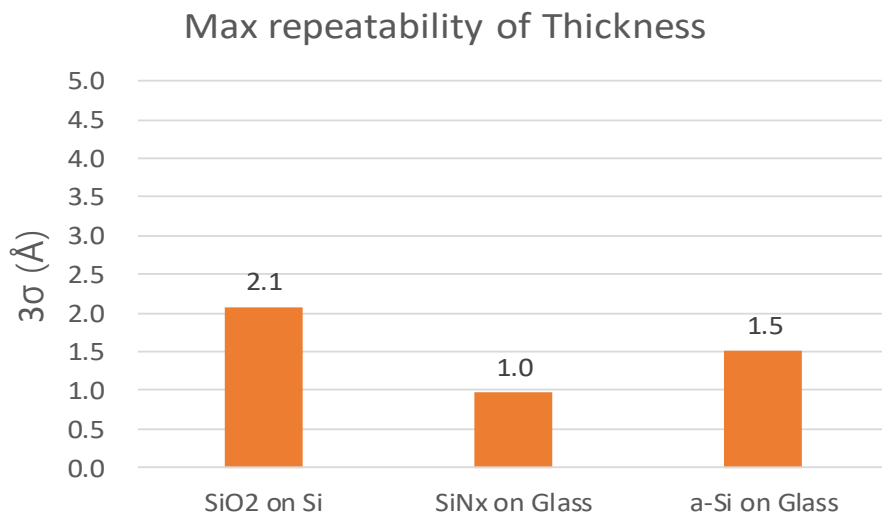


<그림 7. 24 두께 측정 최대 정확도 정리 그래프>

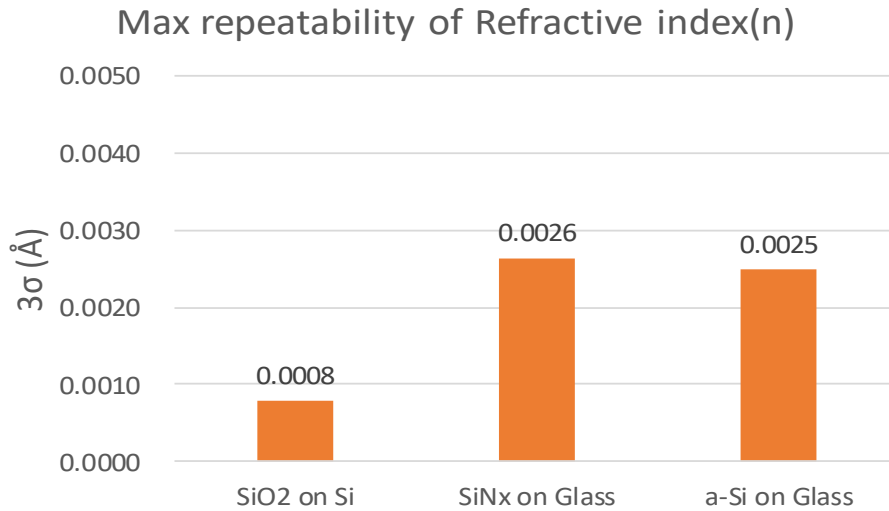


<그림 7. 25 굴절률 측정 최대 정확도 정리 그래프>

그리고 각 샘플의 대한 두께와 굴절률의 최대 3σ 반복도는 다음과 같다.



<그림 7. 26 두께 측정 최대 반복도 정리 그래프>



<그림 7. 27 굴절률 측정 최대 반복도 정리 그래프>

모든 샘플을 종합해 보았을 때, 두께의 경우 최대 정확도는 1.59%, 최대 3σ 반복도는 2.1\AA 이 나왔고 굴절률의 경우 최대 정확도는 1.31%, 최대 3σ 반복도는 0.0026 이 나왔다. 반복도의 경우 일반 적인 분광 타원계(두께 : $3\sigma < 1.5\text{\AA}$, 굴절률 : $3\sigma < 0.005$) 만큼의 성능이 나오지만 정확도의 경우 일반 적인 분광 타원계(두께 : $< 1\%$, 굴절률 : $< 1\%$) 에 비해서 나쁜 편이다.

이는 일단 레퍼런스 장비와의 측정 스팟 영역 직경의 차이(레퍼런스 : 2mm, 제안 광학계 : 60um)로 인해 측정 대상을 완벽하게 일치 시킬 수 없는 점과 그리고 5 장에서 모델링 신호의 여러 가지 오차 요인을 분석하고 보정을 수행했지만 그래도 약간의 오차가 존재하는 상황(<그림 5. 17>) 때문인 것으로 보인다. 추 후 연구에서 이러한 오차가 좀 더 보정 된다면 수직 입사 방식을 이용하여 미세 패턴의 측정이 가능 하면서도 일반적인 분광 타원계와 성능이 같은 장비의 개발이 가능 할 것이다.

제 8 장 결론

본 논문에서는 미세 패턴 박막의 두께 및 광학 상수 측정을 위해 마이크로 분광 타원계를 개발했다. 이는 수직으로 빛을 입사 시키는 방식을 이용해 고배율 렌즈를 사용 하더라도 광학계와 샘플 사이의 긴 작동 거리를 확보 하여, 광학계의 이송과 정렬을 편리하게 만듦으로써 측정 가능한 샘플 크기의 제약을 없앴다. 그리고 400 ~ 800nm 영역의 다파장에 대한 타원 파라미터 분석을 가능 하게 하여 측정의 분해능 및 정확도를 향상 시키는 동시에, 측정 스팟 영역 직경을 60um 까지 줄일 수 있었다.

광학계를 구현하기 위해 필요한 부품들을 선정하고, 출사동 면의 특정 방위각과 반지름 위치에서 Polarizer 의 회전에 따른 다파장의 광 강도 신호를 스펙트로미터로 측정 할 수 있는 광학계를 제작 했다. 이렇게 측정 되는 광 강도 신호의 모델링 식을 광학계를 구성하고 있는 각 광학 부품들의 Jones Matrix 를 곱하여 완성 하였다. 그래서 광 강도 신호는 푸리에 급수 형태의 주기 함수가 되며, 그 함수의 푸리에 계수가 박막의 타원 파라미터에 관한 식으로 표현 됨을 보였다. 결과 적으로 제작된 광학계의 광 강도 측정 신호로부터 타원 편광 상태를 분석하고 박막을 측정 할 수 있는 방법을 만들었다.

그리고 모델링 식의 정확도를 높이기 위해 제작된 광학계에서 편광판의 위치 각을 정확하게 정렬 할 수 있는 방법을 제시 하였다. 그리고 빔 스플리터의 고유 타원 파라미터 물성치 보정 및 스펙트로미터 스팟 영역 효과에 따른 다중 입사각 적분 보정을 통해 실제 신호와 모델링 신호의 오차를 감소시켰다.

제안된 광학계로 측정 된 신호를 모델링 신호와 피팅 하는 과정에 있어서 피팅 변수 종류에 따른 푸리에 계수의 개형 변화 정도를 분석해서

피팅의 우선 순위를 결정 함으로써, 두께와 광학 상수를 동시에 정확히 피팅 할 수 있는 알고리즘을 완성 하였다. 광학 상수를 표현 하는 모델링 식으로는 Cauchy 와 Tauc-Lorentz 모델링을 사용하여 두께와 광학 상수를 표현 하는 6~7 변수의 피팅이 동시에 가능했다.

산업 현장에서 제작되는 $500\text{\AA} \sim 1.1\mu\text{m}$ 두께 범위의 SiO_2 on Si , SiN_x on Glass, a - si on Glass 샘플에 대해 두께 및 광학 상수 측정 테스트를 했으며 고성능의 분광 타원계와 측정 값 비교를 통해 정확도를 검증했고 반복 측정에 따른 3σ 반복도를 검증 했다. 두께의 경우 최대 정확도 1.59%, 3σ 반복도 2.1\AA 이 나왔고, 굴절률의 경우 최대 정확도 1.31%, 3σ 반복도 0.0026 이 나왔다.

이 논문에서 개발 된 광학계에서는 150W 의 텅스텐-할로젠 램프를 사용했으나 출사동 면의 광량 확보가 어려운 문제로 인해 줄일 수 있는 핀 홀 직경에 한계가 있었고(3mm) 측정 가능한 최소 스팟 영역 직경이 $60\mu\text{m}$ 로 결정 되었다. 하지만 메탈 할라이드(Metal Halide)나 제논(Xenon) 같은 고출력 램프를 사용하여 광량을 더 많이 확보 할 수만 있다면 핀 홀의 직경을 더욱 줄일 수 있어 측정 가능한 스팟 영역 직경을 $60\mu\text{m}$ 보다 더 줄일 수 있을 것이다.

비록 일반적인 분광 타원계에 비해서는 측정 정확도가 조금 떨어지지만 다파장 분석이 가능해짐으로써, 기존의 단파장 마이크로 타원계 연구에 비해 다양한 샘플을 고성능으로 측정 할 수 있었다. $60\mu\text{m}$ 직경의 미세 패턴의 측정을 할 수 있으면서도 측정 가능한 샘플 크기의 제약이 없는 점, 그리고 반복도는 일반적인 분광 타원계와 비슷하다는 점에 의해 다양한 산업 현장에서 실용적으로 쓰일 수 있을 것으로 보인다.

REFERENCE

- [1] P. S. Hauge, "Polycrystalline silicon film thickness measurement from analysis of visible reflectance spectra," *Journal of optical society of america* 69.8 (1979): 1143-1152.
- [2] I. Ohlídal, "Immersion spectroscopic reflectometry of multilayer systems. I. Theory," *Journal of optical society of america A* 5.4 (1988): 459-464.
- [3] T. Benson, L. Kamlet, P. Klimecky, and F. Terry JR, "In-situ spectroscopic reflectometry for polycrystalline silicon thin film etch rate determination during reactive ion etching," *Journal of electronic materials* 25.6 (1996): 955-964.
- [4] M. Urbanek, J. Spousta, T. Behounek, and T. Sikola, "Imaging reflectometry in situ," *Applied optics* 46.25 (2007): 6309-6313.
- [5] Y. S. Ghim, A. Suratkhar, and A. Davies, "Reflectometry-based wavelength scanning interferometry for thickness measurements of very thin wafers," *Optics express* 18.7 (2010): 6522-6529.
- [6] M. Ohlídal, I. Ohlídal, P. Klapetek, D. Necas, and A. Majumdar, "Measurement of the thickness distribution and optical constants of non-uniform thin films," *Meas. Sci. Technol.* 22 (2011): 085104
- [7] 조태영, "투명 박막의 입체 형상 측정을 위한 광학 변조 필터 채용 분광 광도계 개발," 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2013).

[8] 김광락, “위상 추출법과 이미징 분광 반사계를 이용한 박막 두께 형상 측정,” 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2015).

[9] K. Kim, S. Kim, S. Kwon, and H. J. Pahk, "Volumetric thin film thickness measurement using spectroscopic imaging reflectometer and compensation of reflectance modeling error," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 15.9 (2014): 1817-1822.

[10] K. Kim, S. Kwon, and H. J. Pahk, “Fast analysis of film thickness in reflectometry using direct phase extraction,” *Current optics and photonics* 1.1 (2017): 29-33.

[11] T. Kihara, and K. Yokomori, “Simultaneous measurement of refractive index and thickness of thin film by polarized reflectances,” *Applied optics* 29.34 (1990): 5069-5073.

[12] S. Özder, O. Koysal, S. San, and F. Ecevit, "Determination of the refractive index dispersion of thick films by continuous wavelet transform," *Thin solid films* 458.1 (2004): 257-262.

[13] H. G. Tompkins, and W. A. McGahan. *Spectroscopic ellipsometry and reflectometry: a user's guide*, New York: John Wiley & Sons, 1999.

[14] 안일신, *엘립소메트리*, 한양대학교 출판부, 2000.

[15] H. Fujiwara, *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*, John Wiley & Sons, 2007.

[16] D. Barton, and F. K. Urbal III, "Ellipsometer measurements using focused and masked beams," *Thin Solid Films* 515 (2006): 911-916.

[17] T. W. Ng, A. Tay, Y. Wang, "Spot focus size effect in spectroscopic ellipsometry of thin films," *Optics communications* 282 (2009): 172-176.

[18] A. H. Liu, P. C. Wayner, and J. L. Plawsky, "Image scanning ellipsometry for measuring nonuniform film thickness profiles," *Applied optics* 33.7 (1994): 1223-1229.

[19] C. Chou, H. K. Teng, C. J. Yu, and H. S. Huang, "Polarization modulation imaging ellipsometry for thin film thickness measurement," *Optics communications* 273.1 (2007): 74-83.

[20] C. Y. Han, and Y. F. Chao, "Photoelastic modulated imaging ellipsometry by stroboscopic illumination technique," *Review of scientific instruments* 77.2 (2006): 023107.

[21] W. Chegal, Y. J. Cho, H. J. Kim, H. M. Cho, Y. W. Lee, and S. H. Kim, "A new spectral imaging ellipsometer for measuring the thickness of patterned thin films," *Japanese journal of applied physics* 43.9A (2004): 6475-6476.

[22] W. Chegal, Y. J. Cho, S. B. Oh, H. M. Cho, Y. W. Lee, and S. H. Kim, "Calibration method for rotating-analyser-type spectral imaging ellipsometers," *Meas. Sci. Technol.* 16 (2005): 716-722.

[23] G. Jin, R. Jansson, and H. Arwin, "Imaging ellipsometry revisited: developments for visualization of thin transparent layers on silicon substrates," *Review of scientific instruments* 67.8 (1996): 2930-2936.

[24] R. F. Cohn, J. W. Wagner, and J. Kruger, "Dynamic imaging microellipsometry: theory, system, design, and feasibility demonstration," *Applied optics* 27.22 (1988): 4664-4671.

[25] K. Leonhardt, U. Droste, and H. J. Tiziani, "Topometry for locally changing materials," *Optics letters* 23.22 (1998): 1772-1774.

[26] P. Boher, O. Thomas, J. P. Piel, and J. L. Stehle, "A new multiple wavelength ellipsometric imager: design, limitations and applications," *Thin Solid Films* 455-456 (2004): 809-818.

[27] S. Otsuki, K. Tamada, and S. Wakida, "Two-dimensional thickness measurements based on internal reflection ellipsometry," *Applied optics* 44.8 (2005) : 1410-1415.

[28] L. Asinovski, D. Beaglehole, and M. T. Clarkson, "Imaging ellipsometry: quantitative analysis," *Phys. Stat. sol. A*. 205.4 (2008): 764-771

[29] A. Furchner, G. Sun, H. Ketelsen, J. Rappich, and K. Hinrichs, "Fast IR laser mapping ellipsometry for the study of functional organic thin films," *Analyst* 140 (2015) : 1791-1797.

[30] C. J. Tang, R. S. Chang, and C. Y. Han, "Using imaging ellipsometry to determine angular distribution of ellipsometric parameters without scanning mechanism," *Optics and Lasers in Engineering* 77 (2016) : 39-43.

[31] U. Neuschaefer- Rube, and W. Holzapfel, "Simultaneous measurement of surface geometry and material distribution by focusing ellipsotopometry," *Applied optics* 41.22 (2002): 4526-4535.

[32] Q. Zhan, and J. R. Leger, "High-resolution imaging ellipsometer," *Applied optics* 41.22 (2002): 4443-4450.

[33] S. V. Shatalin, R. Juskaitis, J. B. Tan, and T. Wilson, "Reflection conoscopy and micro-ellipsometry of isotropic thin film structures," *Journal of microscopy* 179.3 (1995): 241-252.

[34] C. W. See, M. G. Somekh, and R. D. Holmes, "Scanning optical microellipsometer for pure surface profiling" *Applied optics* 35.34 (1996): 6663-6668.

[35] G. D. Feke, D. P. Snow, R. D. Grober, P. Groot, and L. Deck, "Interferometric back focal plane microellipsometry," *Applied optics* 37.10 (1998): 1796-1802.

[36] Q. Zhan, and J. R. Leger. "Microellipsometer with radial symmetry," *Applied optics* 41.22 (2002) : 4630-4637.

[37] F. Linke, and R. Merkel, "Quantitative ellipsometric microscopy at the silicon-air interface," *Review of scientific instruments* 76.063701 (2005): 1-10.

[38] S. H. Ye , S. H. Kim, Y. K. Kwak, H. M. Cho, Y. J. Cho, and W. Chegal, “Angle resolved annular data acquisition method for microellipsometry,” *Opt Express* 15 (2007) : 18056-18065.

[39] S. H. Ye, S. H. Kim Y. K Kwak, H. M. Cho, Y. J. Cho, and W. Chegal, “An ellipsometric data acquisition method for thin film thickness measurement in real time,” *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008):1-5.

[40] A. Tschimwang, Q. Zhan, “High-spatial-resolution nulling microellipsometer using rotational polarization symmetry,” *Appl Opt* 49 (2010) : 1574-1580.

[41] S. Otsuki, N. Murase, and H. Kano, “Back focal plane microscopic ellipsometer with internal reflection geometry,” *Opt Commun* 294 (2013): 24-28

[42] S. Otsuki, N. Murase, and H. Kano, “Mueller matrix microscopic ellipsometer,” *Optics communications* 305 (2013): 194-200.

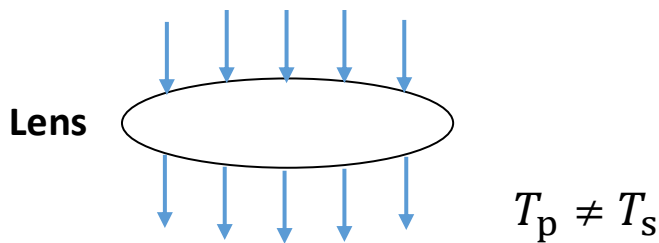
[43] K. Vedam, “Spectroscopic ellipsometry: a historical overview,” *Thin Solid Films* 313-314 (1998) : 1-9.

APPENDIX

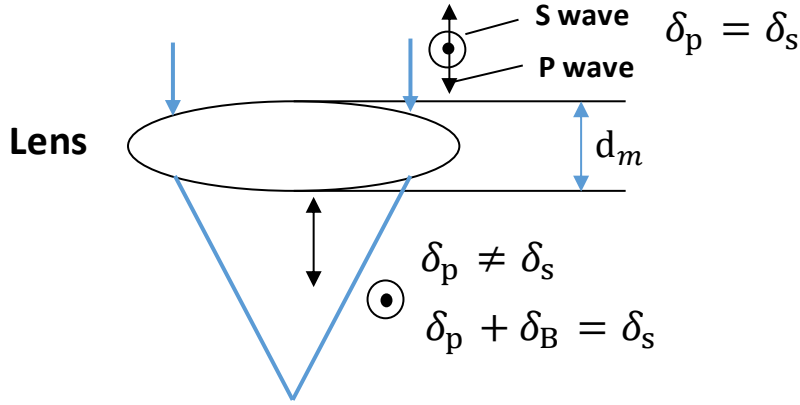
A. 렌즈의 복굴절 현상 고려

앞서 제 5 장에서는 제작된 마이크로 분광 타원계에서 측정 되는 광 강도 신호를 모델링 하는 방법을 제안했었고, 그것의 푸리에 계수가 타원 파라미터로 표현 되는 것을 보였다. 그리고 측정 신호와 모델링 신호의 오차를 줄이기 위해 빔 스플리터의 고유 반사 타원 파라미터 물성치를 보정했었고, 스펙트로미터 스팟 영역 효과를 고려한 다중 입사각 보정을 실시했다. 그 이외에 오차를 추가 적으로 발생 시킬 수 있는 요인을 한번 고려해 보았다.

광학계에 사용되는 렌즈의 경우 이상적으로는 빛의 편광 방향에 상관 없이 굴절률이 일정 해야 한다. 하지만 렌즈의 조립 상태에 의해 렌즈에 응력이 작용한다면 편광 방향에 따른 굴절률 차이가 존재하며 그것을 보정하는 선행 연구 역시 진행 되었다[38].



<그림 A. 1 렌즈의 복굴절로 인한 p파, s파의 투과 계수 차이 발생>



<그림 A. 2 렌즈의 복굴절로 인한 p파, s파 간의 위상 지연 발생>

이번 연구에서도 이와 같은 렌즈의 복굴절 현상 보정을 고려해 보았다. 우선 빛이 렌즈를 투과할 때 p 파, s 파의 진폭 변화 비 및 위상 변화 차이를 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$\varepsilon_B = \left| \frac{T_p}{T_s} \right| \quad (A.1)$$

$$\delta_B = \frac{2\pi}{\lambda} (n_p - n_s) d_m \quad (A.2)$$

T_p 는 렌즈의 p 파 투과 계수 그리고 T_s 는 렌즈의 s 파 투과 계수이다. n_p 는 렌즈의 p 파 굴절률, n_s 는 렌즈의 s 파 굴절률이며, d_m 은 렌즈의 두께를 의미한다. 위 두 식을 통해 렌즈의 복굴절 현상에 따른 편광 상태 변화를 나타내는 Jones Matrix를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$T_B = \begin{pmatrix} \varepsilon_B e^{i\delta_B} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

위와 같은 복굴절 현상에 의한 편광 상태 변화 요소를 출사동의 전기장을 표현 하는 (식 5.1)에 반영하여 새롭게 표현하면 다음과 같다.

$$E_{\text{out}}(\theta, \varphi, \lambda, \omega) = T_{t,BS} T_{B3} T_{B2} T_A T_{t,BS}^T T_{t,BS} R_\varphi T_{B1} T_S T_{B1} R_\varphi T_{r,BS} T_P E_{\text{in}} \quad (\text{A.4})$$

$$T_{B1} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{B1} e^{i\delta_{B1}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.4a})$$

$$T_{B2} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{B2} e^{i\delta_{B2}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.4b})$$

$$T_{B3} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{B3} e^{i\delta_{B3}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.4c})$$

광학계에 사용된 렌즈가 총 3 개(대물렌즈, 튜브렌즈 2)이기 때문에 3 개의 Jones Matrix 인자가 추가 되었다. 나머지 항은 (식 5.1)에 포함된 항들과 같다. T_{B1} 은 대물 렌즈의 복굴절 현상에 의한 편광 상태 변화 행렬이고, T_{B2} 와 T_{B3} 는 각각 첫 번째 튜브렌즈와 두 번째 튜브렌즈에 의한 편광 상태 변화 행렬이다. 위 식을 전개하면 다음과 같다.

$$E_{out,B}(\theta, \varphi, \lambda, \omega) = k \begin{pmatrix} \varepsilon_{B3}\varepsilon_{B2}e^{i\delta_{B3}+\delta_{B2}}t_{BS,p} & 0 \\ 0 & t_{BS,s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 A & \cos A \sin A \\ \cos A \sin A & \sin^2 A \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \varepsilon_{B1}^2 e^{i2\delta_{B1}} R_p \cos^2 \varphi - R_s \sin^2 \varphi & \cos \varphi \sin \varphi (\varepsilon_{B1}^2 e^{i2\delta_{B1}} R_p + R_s) \\ -\cos \varphi \sin \varphi (\varepsilon_{B1}^2 e^{i2\delta_{B1}} R_p + R_s) & -\varepsilon_{B1}^2 e^{i2\delta_{B1}} R_p \sin^2 \varphi + R_s \cos^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{BS,p} E_0 \cos(\omega t - P) \\ r_{BS,s} E_0 \sin(\omega t - P) \end{pmatrix} \quad (A.5)$$

여기서 Analyzer 의 오프셋 각이 입사면에 0° 라고 가정하면 ($A = 0$) 다음과 같이 정리 된다.

$$E_{out,B}(\theta, \varphi, \lambda, \omega) = k \begin{pmatrix} \varepsilon_{B3}\varepsilon_{B2}e^{i\delta_{B3}+\delta_{B2}}t_{BS,p} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \varepsilon_{B1}^2 e^{i2\delta_{B1}} R_p \cos^2 \varphi - R_s \sin^2 \varphi & \cos \varphi \sin \varphi (\varepsilon_{B1}^2 e^{i2\delta_{B1}} R_p + R_s) \\ -\cos \varphi \sin \varphi (\varepsilon_{B1}^2 e^{i2\delta_{B1}} R_p + R_s) & -\varepsilon_{B1}^2 e^{i2\delta_{B1}} R_p \sin^2 \varphi + R_s \cos^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{BS,p} E_0 \cos(\omega t - P) \\ r_{BS,s} E_0 \sin(\omega t - P) \end{pmatrix} \quad (A.6)$$

그리고 스펙트로미터가 받는 포인트 빛의 위치가 출사동에서 방위각 45° 또는 225° 위치에 있다고 가정하면 ($\varphi = \frac{\pi}{4}$ or $\frac{5\pi}{4}$) 검출되는 전기장 식은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned}
 & E_{\text{out,B}}(\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4}) \\
 &= \frac{1}{2} k E_0 \left(\begin{matrix} \{\cos(\omega t - P) u + \sin(\omega t - P) v\} + i\{\cos(\omega t - P) x + \sin(\omega t - P) y\} \\ 0 \end{matrix} \right)
 \end{aligned}
 \tag{A.7}$$

$$\begin{aligned}
 u &= |\varepsilon_{B3} \varepsilon_{B2} t_{BS,p}| |r_{BS,p}| (p \cos(\delta_{t,BS,p} + \delta_{B3} + \delta_{B2}) - q \sin(\delta_{t,BS,p} + \delta_{B3} + \delta_{B2})) \\
 v &= |\varepsilon_{B3} \varepsilon_{B2} t_{BS,p}| |r_{BS,s}| (r \cos(\delta_{t,BS,p} + \delta_{B3} + \delta_{B2}) - s \sin(\delta_{t,BS,p} + \delta_{B3} + \delta_{B2})) \\
 x &= |\varepsilon_{B3} \varepsilon_{B2} t_{BS,p}| |r_{BS,p}| (p \sin(\delta_{t,BS,p} + \delta_{B3} + \delta_{B2}) + q \cos(\delta_{t,BS,p} + \delta_{B3} + \delta_{B2})) \\
 y &= |\varepsilon_{B3} \varepsilon_{B2} t_{BS,p}| |r_{BS,s}| (r \sin(\delta_{t,BS,p} + \delta_{B3} + \delta_{B2}) + s \cos(\delta_{t,BS,p} + \delta_{B3} + \delta_{B2}))
 \end{aligned}
 \tag{A.7a}$$

$$p = c \cos \delta_{r,BS,p} - d \sin \delta_{r,BS,p}$$

$$q = c \sin \delta_{r,BS,p} + d \cos \delta_{r,BS,p}$$

$$r = a \cos \delta_{r,BS,s} - b \sin \delta_{r,BS,s}$$

$$s = a \sin \delta_{r,BS,s} + b \cos \delta_{r,BS,s}$$

$$\tag{A.7b}$$

$$a = |\varepsilon_{B1}^2 R_p| \cos(\delta_{R_p} + 2\delta_{B1}) + |R_s| \cos \delta_{R_s}$$

$$b = |\varepsilon_{B1}^2 R_p| \sin(\delta_{R_p} + 2\delta_{B1}) + |R_s| \sin \delta_{R_s}$$

$$c = |\varepsilon_{B1}^2 R_p| \cos(\delta_{R_p} + 2\delta_{B1}) - |R_s| \cos \delta_{R_s}$$

$$d = |\varepsilon_{B1}^2 R_p| \sin(\delta_{R_p} + 2\delta_{B1}) - |R_s| \sin \delta_{R_s}$$

(A.7c)

(식 A.7)을 이용해 출사동의 광 강도를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_B(\varphi=\frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4}) &= |E_{\text{out},B} \cdot E_{\text{out},B}^*| \\ &= \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |\varepsilon_{B3} \varepsilon_{B2} t_{BS,p}|^2 |r_{BS,s}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1})) + \right. \\ &\quad \left. (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi + 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1})) \right) \left\{ 1 + \right. \\ &\quad \frac{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1})) - (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi + 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1}))}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1})) + (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi + 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1}))} \cos 2(\omega t - P) + \\ &\quad 2 \tan \psi_{r,BS} \frac{\cos \Delta_{r,BS} (\varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 1) + 2 \sin \Delta_{r,BS} \varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \sin(\Delta + 2\delta_{B1})}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1})) + (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi + 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1}))} \sin 2(\omega t - \\ &\quad \left. P) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{8} k^2 E_0^2 |\varepsilon_{B3} \varepsilon_{B2} t_{BS,p}|^2 |r_{BS,s}|^2 |R_s|^2 \left(\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + \right. \\
&2\delta_{B1})) + (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi + 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1})) \left. \right) [\{1 + \alpha_B \cos 2(\omega t - P) + \\
&\beta_B \sin 2(\omega t - P)\}]
\end{aligned}
\tag{A.8}$$

$$\begin{aligned}
\alpha_B \left(\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4} \right) = \\
\frac{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1})) - (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi + 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1}))}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1})) + (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi + 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1}))}
\end{aligned}
\tag{A.8a}$$

$$\begin{aligned}
\beta_B \left(\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{5\pi}{4} \right) = \\
\frac{2 \tan \psi_{r,BS} \{ \cos \Delta_{r,BS} (\varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 1) + 2 \sin \Delta_{r,BS} \varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \sin(\Delta + 2\delta_{B1}) \}}{\tan^2 \psi_{r,BS} (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi - 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1})) + (1 + \varepsilon_{B1}^4 \tan^2 \psi + 2\varepsilon_{B1}^2 \tan \psi \cos(\Delta + 2\delta_{B1}))}
\end{aligned}
\tag{A.8b}$$

앞서 렌즈의 복굴절을 고려하지 않은 (식 5.12)와 비교해보면, 거의 비슷한 형태이나 $\tan \psi$ 항에 ε_{B1}^2 가 곱해지고 Δ 항이 $\Delta + 2\delta_{B1}$ 으로 대체 된다. 그래서 만약 렌즈에 복굴절이 존재 할 경우에 이전의 모델링 식을 사용하면 약간의 오차가 발생할 수 있으며, 앞의 실험에서 측정 신호와 모델링 신호 간에 약간 존재 했던 오차(<그림 5. 17>)의 원인이 될 수도 있다고 추측된다. 하지만 기성품 렌즈에 대한 파장 별 투과 타원 파라미터를 실측

하기가 어렵고, 렌즈의 복굴절 현상이 앞서서 보정에 고려된 요소들에 비해 영향이 거의 없다고 판단하여 이번 연구에서는 보정 하지 않았다. 만약 추 후 연구에서 이런 현상에 대해 보정을 한다면 신호 모델링의 오차를 더욱 감소 시켜서 마이크로 분광 타원계의 성능을 향상 시킬 수 있을 것이다.

ABSTRACT

Development of micro-spectroscopic ellipsometry for thickness and optical constant measurement of fine patterns on thin film

Jaeho Kim

School of Mechanical and Aerospace Engineering

The Graduate School

Seoul National University

In Display and semiconductor industry, the importance of micro-nano pattern metrology is highlighted as the production process becomes highly integrated. Nowadays, the measurement demands not only requires the thickness of thin-film but also the optical constants.

Recently, Ellipsometry is the best and the most commonly used instrument to measure the thickness and the optical constants of the thin-film samples. However, Ellipsometry still carries a limitation; if Ellipsometry uses multiple high-resolution lenses for the spot size due to its oblique incident beam, a risk of collision between the sample and the instrument rises. To overcome this limitation, a research of a micro-ellipsometry which uses vertical incident beams has been conducted. In this case, it may minimize the measuring spot size by using vertical incidence, however, the measurement resolution is still large due to single wavelength light source.

To improve existing limitations, this research develops a micro-spectroscopic ellipsometry by using a multi-wavelength light source. This method combines a vertical incident light and conoscopy method to decrease the spot-size up to 60 μ m. At the same time, the multi-wavelength light source in a range of 400~800nm increases the measurement resolution by sensitively detecting the change of signals according to the

change in material properties of the thin-film. This research introduces a method to analyze the ellipsometry parameters by modeling the measured signals, and multiple variables are implemented to the equation to correctly model signals as the measured ones. A fitting algorithm which enables to precisely calculate the thickness and the optical constants at the same time is developed. Tests are conducted on the SiO_2 on Si, SiN_x on Glass, and a – si on Glass samples with a thickness range of $500\text{\AA} \sim 1.1\mu\text{m}$, and the results has been verified by comparing with the results of a conventional ellipsometry. The thickness measurements have 1.59% accuracy and 2.1\AA 3σ repeatability, and the optical constant measurements have 1.31% accuracy and 0.0026 3σ repeatability

Keywords : Thickness, Optical constant, Measurement, Fine pattern, Conoscopy, Ellipsometry, Micro-Spectroscopic Ellipsometry

Student Number : 2010 - 23206